

PROPUESTA DE GESTIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES PARA LA CIUDAD DE
AMBATO (ECUADOR)

Máster Universitario en Ingeniería de los Recursos Naturales

Trabajo Final de Máster

AUTOR

Diego Andrés Cisneros Galarza

TUTORA

Dra. Anna Bonsfills Pedrós

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa (EPSEM, UPC)

Universidad Politécnica de Cataluña

Manresa, junio 2018

RESUMEN

En la ciudad de Ambato-Ecuador 300 toneladas al día de residuos sólidos se depositan en el relleno sanitario sin separación en la fuente ni tratamiento, lo que imposibilita el aprovechamiento. La legislación ambiental ecuatoriana en el Acuerdo Ministerial 061 indica que los municipios serán responsables de elaborar un plan de gestión integral de residuos sólidos. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la situación actual de residuos en Ambato, y proponer un sistema de tratamiento para la fracción orgánica basado en un modelo flexible que responda a los avances en recolección selectiva que vaya implementando la ciudad a lo largo del tiempo, hablamos de un sistema en aumento del 10%,25%,50%,75% de recolección selectiva. La configuración del reactor fue seleccionada después de analizar la bibliografía existente en la evaluación de los sistemas de tratamiento de residuos de este tipo, identificando a la digestión anaerobia para obtención de biogás como la mejor alternativa para tratar este residuo. Con este antecedente se realizó el cálculo de la fracción orgánica digestible en los biorreactores anaerobios obteniéndose 180.07 ton/reactor para RSMR y 205,8ton/reactor para FORM que ocupan un volumen 735 metros cúbicos por biorreactor. Adicionalmente se calculó el número de biorreactores capaces de tratar esta carga en ciclos de 22 días y a 55 grados centígrados como recomiendan otros autores obteniéndose que entre 1 y 9 biorreactores lograrían operar estas cargas de residuos alcanzando tasas de recolección selectiva que van del 10% al 75%. La generación teórica de biogás fue calculada y se obtuvo valores ascendentes de generación de biogás conforme el sistema de recolección selectiva va en aumento obteniendo un valor de 3916341 metros cúbicos por año, esto al alcanzar el 75% de recolección selectiva. Finalmente, los parámetros de control que gobiernan el proceso de digestión anaerobia fueron calculados teóricamente y el diseño del reactor fue propuesto con sus respectivas medidas y especificaciones. Concluyendo al final que la digestión anaerobia de residuos orgánicos tiene mejores resultados energéticos cuando la recolección selectiva aumenta. Este estudio puede servir para adoptar nuevas políticas de recolección diferenciada de residuos municipales en Ambato y la consecuente implementación del proyecto.

Palabras clave:

Residuos, aprovechamiento, compostaje, tratamiento, gestión.

ABSTRACT

In the city of Ambato-Ecuador 300 tons per day of solid waste are landfilled without separation and treatment, that makes it impossible to use it. The Ecuadorian environmental legislation in Ministerial Agreement 061 indicates that the municipalities will be responsible for developing a plan for the integral management of solid waste. The present work aims to study the current waste situation in Ambato and proposes a treatment system for the organic fraction based on a flexible model that responds to the advances in selective collection that the city is implementing over time, we are talking about an increasing system of 10%,25%,50%,75% selective collection. The configuration of the reactor was selected after analyzing the existing bibliography in the evaluation of waste treatment systems, identifying anaerobic digestion as the best alternative to treat this waste. With this background the calculation of the digestible organic fraction in the anaerobic bioreactors was 180.07 ton/reactor for RSMR and 205.8ton/reactor for FORM that occupy a volume of 735 cubic meters per bioreactor. Additionally, the number of bioreactors able to treat this load in 22-day cycles and 55 degrees Celsius was calculated as recommended by other authors, obtaining that between 1 and 9 bioreactors would be able to operate these waste loads reaching selective collection rates ranging from 10% to 75%. The theoretical generation of biogas was calculated and ascending values of biogas generation were obtained as the selective collection system is increasing, obtaining a value of 3916341 cubic meters per year, this reaching 75% of selective collection. Finally, the control parameters that govern the anaerobic digestion process were calculated theoretically and the reactor design was proposed with its respective measurements and specifications. Concluding that the anaerobic digestion of organic waste has better energy results when selective harvesting increases. This study can be used to adopt new policies for differentiated collection of municipal waste in Ambato and the consequent implementation of the project.

Key words:

Waste, utilization, composting, treatment, management.

Contenido

1.	Introducción	1
2.	Situación actual del manejo de residuos municipales en Ecuador	2
2.1	Situación geográfica de Ecuador	2
2.2	Producción per cápita de residuos sólidos por región natural en Ecuador	3
2.3	Marco legal aplicable a la gestión de residuos sólidos en Ecuador	3
2.3.1	Constitución de la república de Ecuador.....	3
2.3.2	Código orgánico del ambiente	4
2.3.3	Código orgánico de organización territorial, autonomía y descentralización	4
2.3.4	Ley de prevención y control de la contaminación ambiental	4
2.3.5	Acuerdo ministerial 061	4
2.4	Modelo de gestión para el manejo de residuos sólidos.....	5
2.5	Separación en la fuente.....	5
2.6	Clasificación de los residuos sólidos producidos por tipo de residuo (área urbana)	6
2.7	Residuos sólidos recolectados al día	6
2.8	Disposición final de residuos sólidos en Ecuador sin tratamiento previo.....	7
2.9	Separación en la fuente de residuos en hogares	8
3.	Situación actual de la gestión de residuos sólidos en Ambato	8
3.1	Situación geográfica de Ambato	9
3.2	Descripción del sistema actual de manejo de residuos sólidos municipales.....	9
3.3	Diagrama de flujo del manejo de residuos en Ambato.....	10
3.4	Clasificación de residuos sólidos domiciliarios y comerciales en la ciudad de Ambato ...	11
3.5	Proceso de gestión actual de residuos en Ambato	11
3.5.1	Barrido.....	12
3.5.2	Almacenamiento y recolección.....	12
3.5.3	Tratamiento.....	15
3.5.4	Disposición Final.....	15
3.5.5	Cantidad de residuos sólidos depositados en el relleno sanitario	16
3.5.6	Cálculo de la fracción orgánica de residuos municipales FORM	17
3.5.7	Tratamiento de lixiviados	17
4	Proyección a futuro del manejo de la gestión de residuos en Ambato	20
4.1	Recolección diferenciada y separación en la fuente.....	21

4.1.1	Separación en la fuente.....	21
4.1.2	Campaña de capacitación a la ciudadanía en un barrio piloto en Ambato	21
4.2	Valoración y Tratamiento.....	24
5	Estado del arte	25
5.1	La producción de hidrógeno por fermentación oscura de los residuos sólidos municipales y los residuos de mataderos: un proceso de dos fases.....	25
5.2	Impacto en los recursos de los sistemas municipales de tratamiento de residuos sólidos en las ciudades chinas según la evaluación híbrida del ciclo de vida	26
5.3	Recuperación de energía de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales: una evaluación de instalaciones basada en opciones reales	26
5.4	La digestión anaeróbica como fuente de energía sostenible: una dinámica enfoque para mejorar la recuperación de desechos orgánicos	27
6	Objetivos	27
7	Fundamento teórico de la digestión anaerobia de residuos	28
7.1	Digestión Anaerobia.....	28
7.1.1	Fases de la fermentación anaerobia	28
7.2	Digestión anaerobia para tratar la fracción orgánica de desechos sólidos municipales ..	30
7.3	Parámetros ambientales y operacionales del proceso	31
7.3.1	pH y alcalinidad	31
7.3.2	Potencial redox.....	31
7.3.3	Nutrientes.....	31
7.3.4	Temperatura.....	33
7.3.5	Toxicidad e inhibición.....	33
7.3.6	Agitación /mezclado.....	33
7.3.7	Otros parámetros	34
7.3.8	Sólidos totales y volátiles	34
8	Caso de Estudio	34
8.1	Criterios de selección del sistema de tratamiento de residuos orgánicos municipales ...	34
8.2	Cálculo teórico del tonelaje de residuos para digestión anaerobia.....	35
8.3	Aspectos de diseño del reactor	37
8.3.1	Densidad de las fracciones	37
8.3.2	Cantidad de residuos digeribles	38
8.3.3	Cálculo del número de biorreactores.....	38
8.3.4	Producción y consumo de biogás.....	39

8.4	Área de implementación del proyecto.....	40
8.5	Parámetros de funcionamiento del biorreactor	41
8.5.1	Tiempo de retención hidráulico	41
8.5.2	Velocidad de carga orgánica	42
8.5.3	Relación carbono nitrógeno	42
8.5.4	Control de pH	44
8.5.5	Cálculo del flujo de calor	44
8.6	Características generales de calidad del biogás	45
8.7	Análisis Económico	46
8.7.1	Análisis económico para implementación de una planta industrial de tratamiento de residuos municipales.....	46
8.7.2	Análisis económico y operacional de una planta piloto para digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos	47
8.7.3	Operación de planta piloto	48
9	Resultados	49
9.1	Número de reactores	49
9.2	Cantidad de residuos digeribles y cargas diarias en biorreactores.....	49
9.3	Producción de Biogás	51
9.4	Parámetros de control del biorreactor	51
9.5	Diseño y funcionamiento	52
9.5.1	Operación en discontinuo	52
9.5.2	Plano del biorreactor para residuos sólidos municipales de Ambato.....	53
10	Conclusiones.....	55
11	Bibliografía	56
12	Anexos	58
12.1	Planta piloto de biogás CE 642	58
12.2	Planta de tratamiento mecánico-biológico de Sant Adrià de Besòs	59

NOMENCLATURA

ΔT : Gradiente de temperatura

a: ancho

BR: Tasa de biogás

C/N: Relación carbono nitrógeno

Cp: Capacidad calorífica

COs = Concentración de materia orgánica del sustrato

DA: Digestión Anaerobia

EPM-GIDSA: Empresa pública municipal para la gestión integral de desechos sólidos de Ambato

FO: Fracción orgánica

FORM: Fracción orgánica de residuos municipales

GIRS: Gestión integral de residuos sólidos

Gwh: Giga watt hora

h: altura

hp: caballos de fuerza

INEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

INEN: Instituto ecuatoriano de normalización

KgSV: Kilogramos de sólidos volátiles

KJ: Kilojoules

L: largo

m: masa

mm: milímetros

Mv: milivoltios

Nm³: metros cúbicos normales

PNGIDS: Programa nacional para la gestión integral de desechos solidos

RSM: Residuo solido municipal

RSMR: Residuos sólidos municipales residuales

RS: Recolección selectiva

RSU: Residuos sólidos urbanos

PET: Poliestireno tereftalato

Ph: Potencial de hidrógeno

PTMB: Planta de tratamiento mecánico y biológico

Q: Flujo de calor

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

TRH: Tiempo de retención hidráulico

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

V: Volumen

VCO: Velocidad de carga orgánica

Vr: Volumen del residuo en el reactor

WBAR: Peso de residuos provenientes del barrido de calles y avenidas.

WCUR: Peso de residuos provenientes de curtiembres y tenerías

WDOMCOM: Peso de residuos sólidos provenientes de casas, y comercios

WIND: Peso de residuos industriales asimilables a domésticos

WHOS: Peso de residuos del sector sanitario: clínicas hospitales y centros de salud

WMER: Peso de residuos de plazas y mercados

WPAR: Peso de residuos de usuarios particulares que solicitan la disposición final

WRSMR: Peso de Residuos sólidos municipales residuales

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Generalidades de Ecuador.....	2
Tabla 2 Personal Administrativo / Operativo EPM-GIDSA	10
Tabla 3 Clasificación de residuos domiciliarios comerciales en Ambato en 2015	11
Tabla 4 Zonas de recolección de residuos urbanos en Ambato.....	13
Tabla 5: Total de residuos sólidos ingresados en relleno sanitario de Ambato por día	17
Tabla 6 Componentes de la planta de lixiviados.....	18
Tabla 7 Colores estandarizados para contenedores de residuos.....	23
Tabla 8 Valorización y tratamiento de residuos para Ambato.....	24
Tabla 9 Valores promedio aproximados de la relación carbono nitrógeno de residuos orgánicos disponibles en el medio rural.....	32
Tabla 10 Concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia	33
Tabla 11 Criterios de selección de reactor para tratamiento de residuos orgánicos	35
Tabla 12 Cantidad de residuos obtenidos para cuatro escenarios de recolección diferenciada en Ambato.....	37
Tabla 13 Densidad de las fracciones de residuos que alimentan los digestores	37
Tabla 14 Tipos de operación para digestión anaerobia	38
Tabla 15 Contenidos de sólidos, sustancias orgánicas y rendimientos de biogás para residuos orgánicos en digestión anaeróbica	39
Tabla 16 Resumen de propietarios costos y alternativas para proyecto de gestion integral de residuos solidos en Ambato	41
Tabla 17 Cuantificación de subproductos de residuos orgánicos de la Paz.....	43
Tabla 18 Propiedades de calidad de biogás	45
Tabla 19 Presupuesto para construcción de planta industrial de tratamiento de residuos municipales para Ambato	46
Tabla 20 Cotización de planta piloto de digestión anaerobia para residuos orgánicos.....	47
Tabla 21 Número de reactores para cada fracción de recogida selectiva	49
Tabla 22 Producción teórica de biogás de la recolección selectiva	51
Tabla 23 Resumen de parámetros de funcionamiento de biorreactor para residuos orgánicos	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Ecuador.	2
Figura 2 Mapa de producción per cápita de residuos sólidos por región natural (kg/hab/día) de 2014 a 2015.....	3
Figura 3 Municipios con separación en la fuente a nivel nacional (%) 2014-2015	5
Figura 4 Clasificación de residuos en áreas urbanas.....	6
Figura 5 Desagregación de residuos orgánicos generados en área urbana recopilado en 2015.....	6
Figura 6 Porcentaje de recolección diferenciada por región natural 2014-2015	7
Figura 7 Métodos de disposición final en Ecuador periodo 2014-2015	7
Figura 8 Distribución en porcentaje por sitio de disposición final a nivel nacional en el periodo de 2014-2015.	8
Figura 9 Hogares que clasificaron residuos 2010-2015 (%)	8
Figura 10 Mapa de Ambato.....	9
Figura 11 Diagrama de flujo de los residuos en Ambato	10
Figura 12 Camión de carga lateral y sistema contenerizado	12
Figura 13 Relleno Sanitario de Ambato.....	16
Figura 14 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de lixiviados	18
Figura 15 Jerarquización del manejo de residuos sólidos.....	21
Figura 16 Mapa de parroquias de Ambato	22
Figura 17 Contenedor para residuos municipales	23
Figura 18 Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas.....	30
Figura 19 Diagrama de flujo teórico de residuos estudiado para el caso de Ambato-Ecuador.....	36
Figura 20 Avance en el tiempo de recolección selectiva	37
Figura 21 Balance de masas del proceso de digestión anaerobia.....	51
Figura 22 Tiempos de llenado de biorreactores para digestión anaerobia de residuos sólidos de Ambato.....	53
Figura 23 Diseño de planta de digestión anaerobia para residuos sólidos orgánicos de Ambato ...	54
Figura 24 Diagrama de flujo de residuos Ecoparque Sant Adria de Besos.....	59
Figura 25 Biorreactor de residuos orgánicos de Sant Adria de Besòs.....	60

1. Introducción

Un residuo es todo aquello que se genera como consecuencia no deseada de una actividad humana y, en general de cualquier ser vivo. El ser humano, para subsistir tiene que transformar de manera continuada ciertos productos que se encuentran a su alcance en otros que pueda asimilar, generando consecuentemente una parte de residuos.

El ciclo natural de la materia es circular y con el conjunto de los elementos químicos se hacen y deshacen toda una serie de estructuras que generan residuos, todos ellos asimilables por la propia naturaleza.

Es la intervención humana la que rompe este ciclo natural de la materia, cuando el hombre quiere obtener los bienes que necesita para progresar y mejorar su calidad de vida. De esta manera, el hombre extrae las primeras materias y después de procesarlas y de utilizarlas deja una serie de restos que no son asimilables, sino que se acumulan o se depositan en zonas y lugares en muchas ocasiones sin ningún tipo de tratamiento.

La problemática de la producción creciente de residuos es ya un asunto de interés mundial. Reducir los residuos en el lugar donde se producen y reciclarlos son los mejores métodos para parar la creciente oleada de producción de desechos a todos los niveles. (Casas, et al.2005)

De acuerdo a información de (INEC, 2015) la población de Ecuador es de 15 774 749 habitantes, de los cuales el 63% habita en el área urbana y el 37 % restante en el área rural. Con respecto a la dotación de recursos básicos el 72% de las viviendas disponen de agua a través de red pública y el 77% de los hogares eliminan sus residuos a través de vehículos recolectores. En Ecuador la gestión de residuos sólidos es responsabilidad de los municipios. Según datos recabados directamente por el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS), se determinó que en el año 2011 el 52 % de la población contaba con un manejo responsable de los residuos sólidos.

Según datos del Ministerio del Ambiente del año 2014 en el año 2012 la generación aproximada de residuos en el país fue de 4 139 512 toneladas métricas por año, lo cual representa una generación per cápita promedio de 0,73 kg por día. En cuanto a la disposición final de los residuos sólidos, el 65% lo realizan en vertederos no controlados y 35% en rellenos sanitarios, lo cual demuestra que los vertederos no controlados están siendo reemplazados por rellenos sanitarios. Se estimó que para el año 2017 el país generaría aproximadamente 5 546 921 de toneladas métricas anuales de residuos, por lo que una gestión adecuada de los mismos es de vital importancia. (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2014)

2. Situación actual del manejo de residuos municipales en Ecuador

2.1 Situación geográfica de Ecuador

Ecuador se localiza al noroeste de América del sur. Limita al norte con Colombia, al sur y este con el Perú y al oeste con el océano Pacífico (Figura 1). Ocupa una superficie de 271 000 km². La capital es Quito, que se constituye en Distrito Metropolitano.

Ecuador se ubica en la línea ecuatorial y está dividido en cuatro regiones naturales: la costa, que comprende aproximadamente la cuarta parte del territorio nacional; la sierra, que se extiende a lo largo de las dos cadenas montañosas de la cordillera de los Andes; el oriente o región amazónica, al este de la cordillera antes señalada, y la región insular o islas Galápagos, localizada a 965 km de la costa, en el océano Pacífico.



Figura 1 Mapa de Ecuador.

Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2002

Ecuador es el primer país del mundo en tener los derechos de la naturaleza garantizados en su constitución. En la tabla 1 se indican generalidades de Ecuador

Tabla 1 Generalidades de Ecuador

Fuente: INEC, 2015

<i>Capital</i>	<i>Quito</i>
<i>Habitantes</i>	<i>16 526 175</i>
<i>Idioma</i>	<i>Español</i>
<i>Forma de Gobierno</i>	<i>Republica presidencialista</i>
<i>Órgano Legislativo</i>	<i>Asamblea Nacional del Ecuador</i>
<i>Superficie</i>	<i>283 561 km²</i>
<i>Moneda</i>	<i>Dólar estadounidense</i>
<i>Punto más alto</i>	<i>Volcán Chimborazo</i>

<i>PIB Nominal</i>	<i>Puesto 47 en el mundo</i>
<i>Municipios</i>	<i>221</i>
<i>Clima</i>	<i>Primaveral durante todo el año</i>

2.2 Producción per cápita de residuos sólidos por región natural en Ecuador

A partir de la información proporcionada por los municipios, se determinó que cada habitante de Ecuador en el sector urbano, produce en promedio 0,58 kg/hab/día de residuos sólidos en 2015, en tanto que, en el año 2014, la producción per cápita fue de 0,57 kg/hab/día. En la figura 2 a continuación se detalla la producción per cápita por región natural.

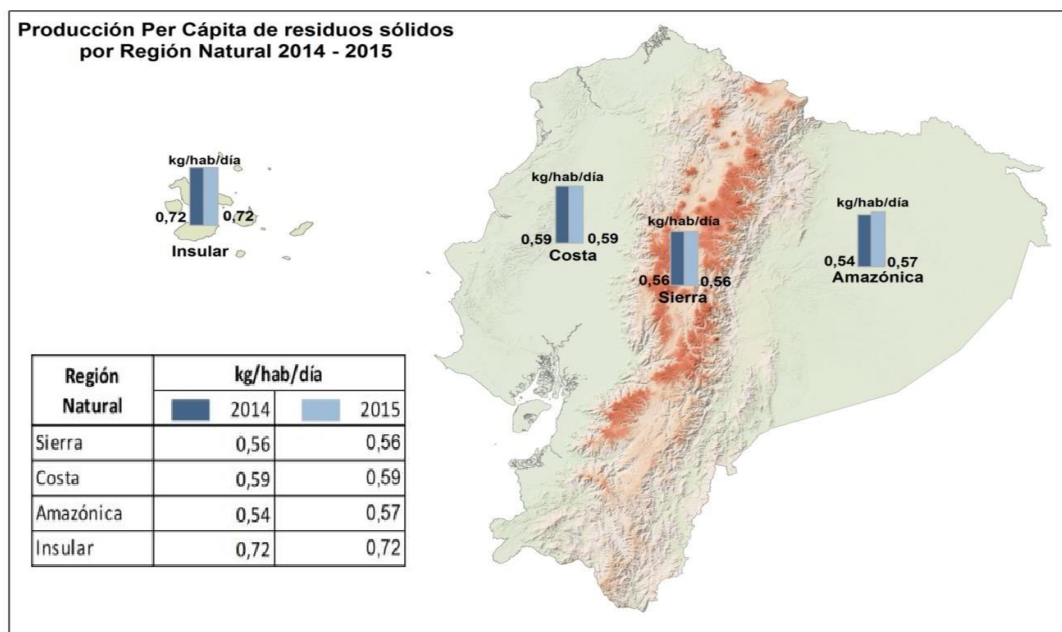


Figura 2 Mapa de producción per cápita de residuos sólidos por región natural (kg/hab/día) de 2014 a 2015
Fuente: INEC, 2015

2.3 Marco legal aplicable a la gestión de residuos sólidos en Ecuador

A continuación, se cita el marco legal aplicable a la gestión de residuos sólidos en Ecuador:

2.3.1 Constitución de la república de Ecuador

Registro oficial no. 449 del 20 de octubre del 2008 Título II, Artículo 14, del Capítulo 2, de los “Derechos del buen vivir”, se indica que “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *Sumak Kawsay* su traducción a quechua. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la

conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados”.

2.3.2 Código orgánico del ambiente

Art. 27.- Facultades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Metropolitanos y Municipales en materia ambiental. En el marco de sus competencias ambientales exclusivas y concurrentes corresponde a los gobiernos autónomos descentralizados metropolitanos y municipales el ejercicio de las siguientes facultades, en concordancia con las políticas y normas emitidas por los gobiernos autónomos provinciales y la autoridad ambiental nacional:

6. Elaborar planes, programas y proyectos para los sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos o desechos sólidos.

2.3.3 Código orgánico de organización territorial, autonomía y descentralización

Artículo 55.- Competencias exclusivas del gobierno autónomo descentralizado municipal. Los gobiernos autónomos descentralizados municipales tendrán las siguientes competencias exclusivas sin perjuicio de otras que determine la ley:

d) Prestar los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, actividades de saneamiento ambiental y aquellos que establezca la ley;

2.3.4 Ley de prevención y control de la contaminación ambiental

Publicada en el registro oficial suplemento no. 418 del 10 de septiembre de 2004 dentro del Art. 10 se indica que: queda prohibido descargar, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones, cualquier tipo de contaminantes que puedan alterar la calidad del suelo y afectar a la salud humana, la flora, la fauna, los recursos naturales y otros bienes.

2.3.5 Acuerdo ministerial 061

Reforma del libro vi del texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente publicado en registro oficial n.- 316, dentro del Art. 57 Responsabilidades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales se indica: Garantizarán el manejo integral de residuos y/o desechos sólidos generados en el área de su competencia, ya sea por administración o mediante contratos con empresas públicas o privadas; promoviendo la minimización en la generación de residuos y/o desechos sólidos, la separación en la fuente, procedimientos adecuados para barrido y recolección, transporte, almacenamiento temporal de ser el caso, acopio y/o transferencia; fomentar su aprovechamiento, dar adecuado tratamiento y correcta disposición final de los desechos que no pueden ingresar nuevamente a un ciclo de vida productivo; además dar seguimiento para que los residuos peligrosos y/o especiales sean dispuestos, luego de su

tratamiento, bajo parámetros que garanticen la sanidad y preservación del ambiente. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales deberán:

- a) Elaborar e implementar un Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos en concordancia con las políticas nacionales y al Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos.

2.4 Modelo de gestión para el manejo de residuos solidos

El modelo de gestión se refiere a la prestación de servicios correspondientes a la gestión integral de residuos sólidos en Ecuador, y que puede ser en forma directa, por contrato, gestión compartida por delegación a otro de gobierno o cogestión con la comunidad y empresas de economía mixta.

En ese sentido, durante el año 2015, 184 de 221 municipios gestionaron sus residuos sólidos a través de unidades, departamentos o direcciones de cada municipio, 5 lo hicieron como mancomunidad que es la unión de 2 o más municipios constituidos legalmente, 12 lo realizaron mediante empresas públicas y 20 a través de empresas públicas mancomunidades. En comparación al año 2014, el número de municipios que gestionaron los residuos sólidos a través de una empresa pública mancomunada disminuyó en dos, los mismos que, para el año 2015, pasaron a gestionar los residuos sólidos como empresa pública. (INEC, 2015)

2.5 Separación en la fuente

En el año 2015 de los 221 municipios, 83 iniciaron o mantuvieron procesos de separación en la fuente de residuos sólidos que representa el 38% del total a nivel nacional, mientras que, en el año 2014, se presentó un 37% de ellos que mantuvieron procesos de separación en la fuente, tal y como se muestra en la figura 3.

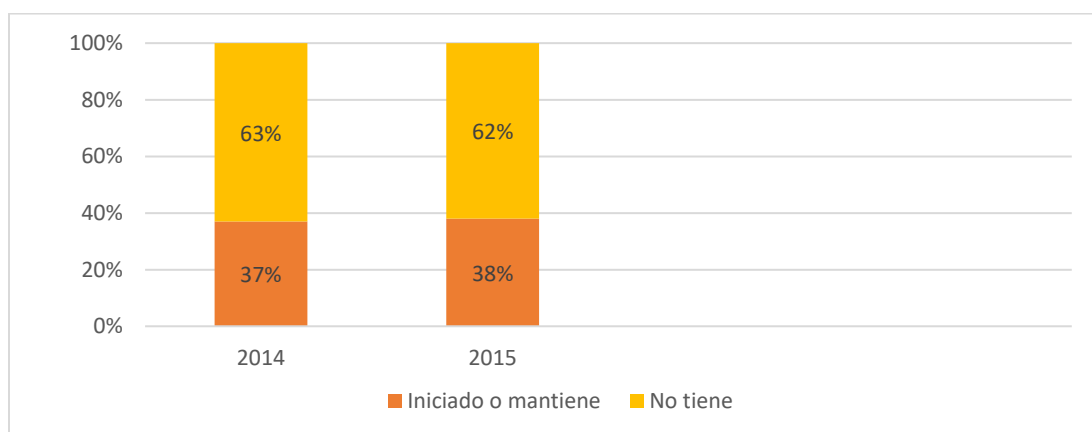


Figura 3 Municipios con separación en la fuente a nivel nacional (%) 2014-2015
Fuente: INEC, 2015

2.6 Clasificación de los residuos sólidos producidos por tipo de residuo (área urbana)

En la figura 4 se detalla que, en 2015 de los 221 municipios, 161 realizaron clasificación de residuos sólidos producidos por tipo de residuos en el área urbana, teniendo como resultado el 59% de residuos orgánicos y el 41% de residuos inorgánicos. En la figura 5 se presenta la desagregación de residuos inorgánicos (cartón, papel, plástico, vidrio, madera, metal, chatarra, caucho, textil, bombillas, pilas y desechos sanitarios)

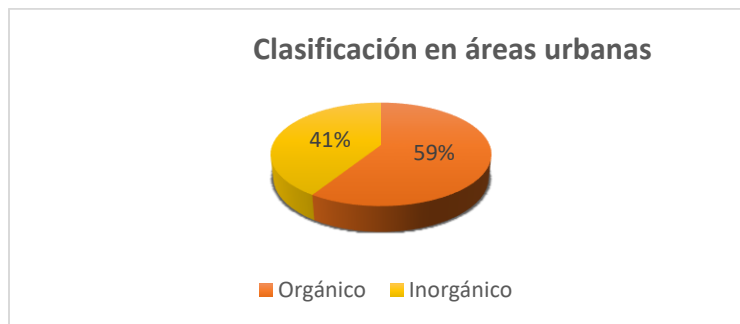


Figura 4 Clasificación de residuos en áreas urbanas
Fuente: INEC, 2015

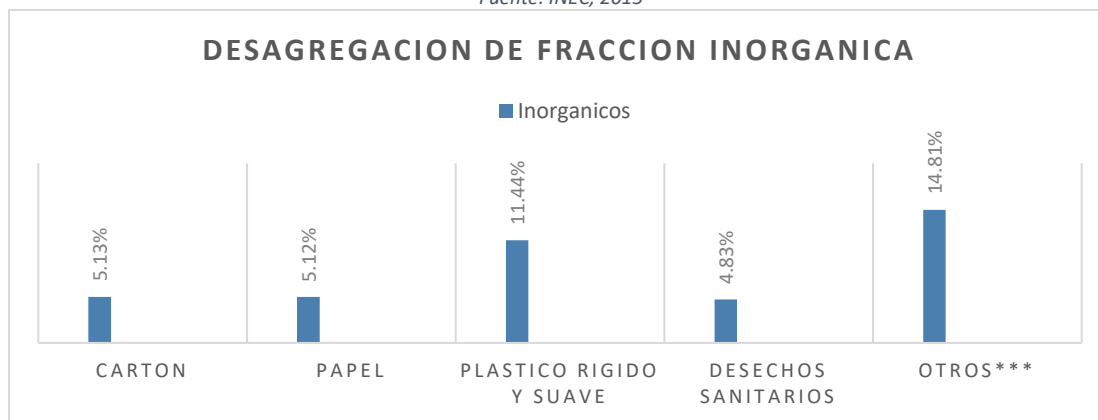


Figura 5 Desagregación de residuos orgánicos generados en área urbana recopilado en 2015.
Otros *** corresponde a vidrio, madera, chatarra, caucho, textil, lamparas, focos ahorradores, pilas, metal,
Fuente: INEC, 2015

2.7 Residuos sólidos recolectados al día

El total de toneladas de residuos sólidos recolectados al día en 2014 fue de 11 203,24 ton/día, en tanto que en el 2015 fue de 12 829,41 ton/día. La cantidad de residuos recolectados de forma diferenciada pasó del 10% en 2014, al 11% en el año 2015. En la figura 6 se indica por colores la recolección diferenciada y no diferenciada en las regiones naturales que integran el Ecuador.

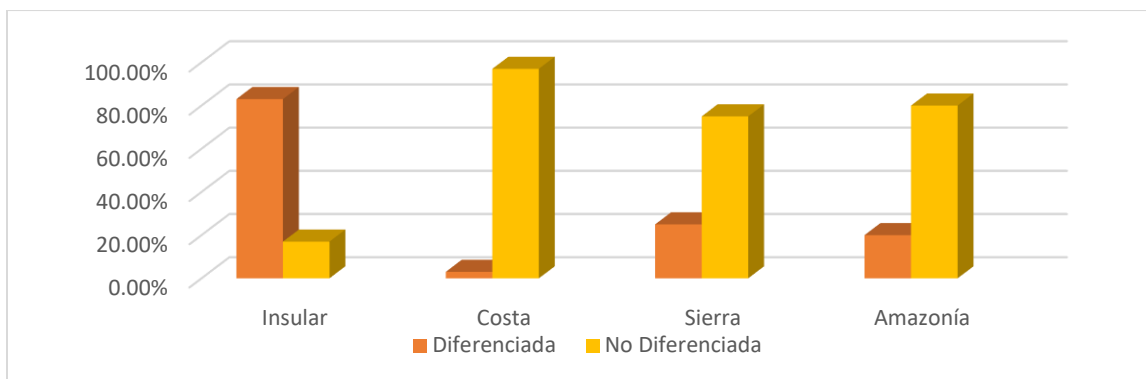


Figura 6 Porcentaje de recolección diferenciada por región natural 2014-2015
Fuente: INEC, 2015

2.8 Disposición final de residuos sólidos en Ecuador sin tratamiento previo

En el 2015, 93 municipios dispusieron los residuos sólidos en rellenos sanitarios, presentando un aumento con respecto al año 2014. Así mismo, haciendo referencia al año 2014, en 2015 hubo una disminución de vertederos y un aumento en celdas emergentes, que son sitios temporales controlados para disponer residuos, ratificándose que los municipios poco a poco van cumpliendo con lo estipulado en el acuerdo ministerial No. 052, el cual es la reforma al acuerdo ministerial No. 031 “Reforma al texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente del Libro VI del Anexo 6, Proceso de cierre técnico y saneamiento de vertederos de los desechos sólidos y viabilidad técnica” que obliga a los municipios a cerrar sus vertederos e implementar rellenos sanitarios para la disposición final de residuos sólidos. Ver figura 7.

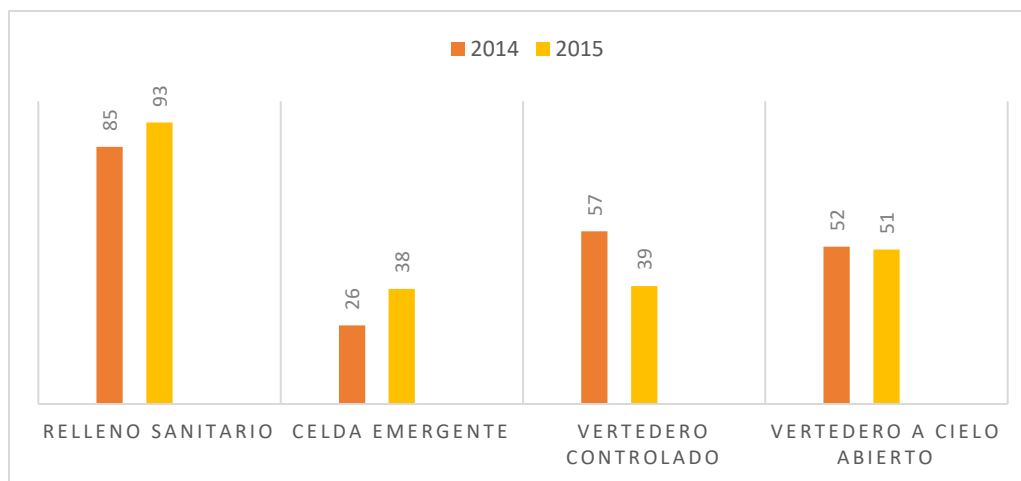


Figura 7 Métodos de disposición final en Ecuador periodo 2014-2015
Fuente: INEC, 2015

Se observa un aumento del cierre de vertederos en el Ecuador y se ha promovido la construcción de rellenos sanitarios en las ciudades. A continuación, se muestra la distribución en porcentajes de los métodos de disposición final. Ver figura 8



Figura 8 Distribución en porcentaje por sitio de disposición final a nivel nacional en el periodo de 2014-2015.
Fuente: INEC, 2015

2.9 Separación en la fuente de residuos en hogares

En el año 2016 a nivel nacional el 41.46% de los hogares ecuatorianos clasificó los residuos en orgánicos e inorgánicos tal y como indica la figura 4, cuatro de cada diez hogares realizaron esta práctica, los porcentajes totales en el transcurso del tiempo del año 2010 al 2015 se muestran a continuación en figura 9 y se confirma un aumento en la separación en la fuente de generación.

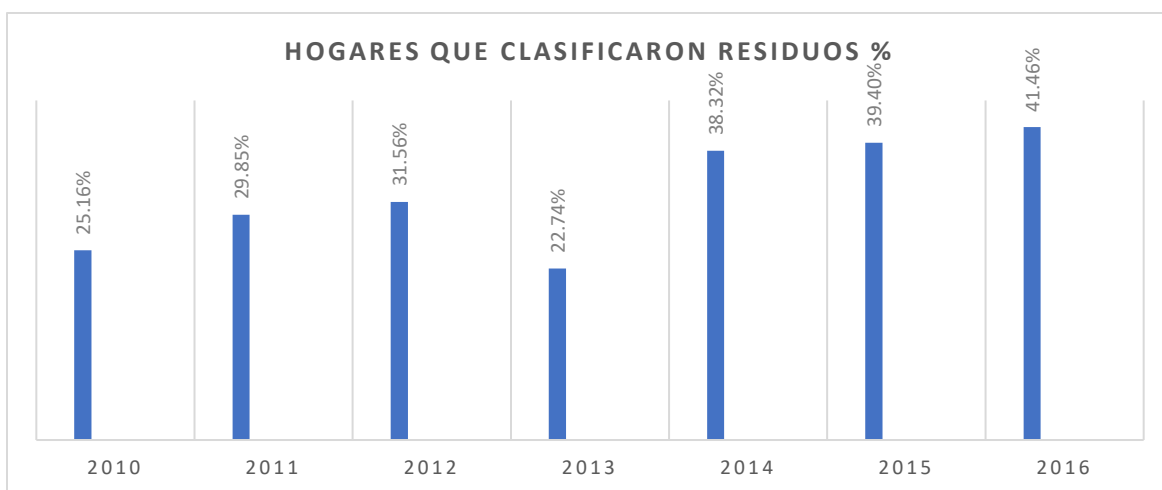


Figura 9 Hogares que clasificaron residuos 2010-2015 (%)
Fuente: INEC, 2015

3. Situación actual de la gestión de residuos sólidos en Ambato

3.1 Situación geográfica de Ambato

Ambato es una ciudad ecuatoriana, capital de la provincia de Tungurahua. Se encuentra en la cordillera occidental, está enclavada en una hondonada formada por seis mesetas lo que le da un clima agradable, Ambato está ubicada a 78°; 37' 11" de longitud con relación al meridiano de Greenwich y a 1° 13' 28" de latitud sur con relación a la línea equinoccial, a 2577 metros sobre el nivel del mar. Ambato tiene 514 354 habitantes correspondiente al último censo de población del año 2015. Ambato está dividido en parroquias, 9 urbanas y 18 rurales.

La ciudad fue destruida varias veces por terremotos y erupciones volcánicas. El último de estos terremotos se dio el 5 de agosto de 1949, un terremoto con epicentro en la ciudad de Pelileo destruyó la ciudad, pero gracias a la tenacidad de sus habitantes, logró levantarse nuevamente en menos de dos años. En honor a esta lucha, se celebra cada año la Fiesta de las Flores y de las Frutas, ha trascendido fronteras, y es una de las fiestas más importantes de Ecuador.

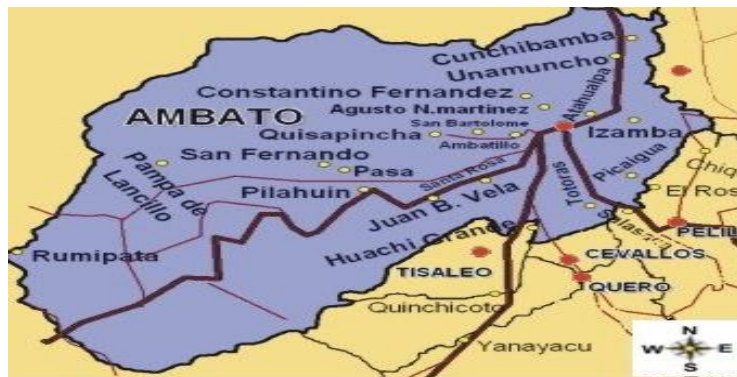


Figura 10 Mapa de Ambato
Fuente: Gonzales Suarez, 1994

3.2 Descripción del sistema actual de manejo de residuos sólidos municipales

El sistema actual de gestión de residuos sólidos en Ambato es manejado por la Empresa Pública Municipal para la Gestión Integral de Desechos Sólidos del cantón Ambato (EPM-GIDSA), institución que tiene como objetivo la prestación de servicios referente a la recolección y disposición final de residuos producidos en la ciudad de Ambato, y por otro lado la empresa privada GLOBALPARTS S.A. que presta sus servicios de recolección mediante el sistema de contenerización de residuos sólidos en Ambato, teniendo a su cargo la recolección de 9 ciudadelas (9 zonas), cuenta con 3 vehículos de carga lateral y 681 contenedores.

El área administrativa – operativa de la empresa pública de residuos de Ambato cuenta con el siguiente tipo y número de personal tal y como se detalla en la tabla 2:

Tabla 2 Personal Administrativo / Operativo EPM-GIDSA
Fuente: Díaz, y otros, 2015

Área	Administrativo	Operativo
Gerencia	7	1
Planificación	5	1
Administrativo Financiero	14	1
Mantenimiento / Operaciones	2	3
Mantenimiento	1	6
Operación / Recolección	2	66
Operación / Barrido	1	98
Operación Relleno Sanitario	2	7
Comercialización	2	0
Total, de Trabajadores	36	183

3.3 Diagrama de flujo del manejo de residuos en Ambato

El siguiente diagrama en la figura 11 representa el ciclo de manejo actual de los residuos sólidos en la ciudad de Ambato que efectúa la Empresa Pública Municipal para la Gestión Integral de Desechos Sólidos de Ambato EPM-GIDSA, desde la generación hasta la disposición final. Inicialmente los residuos son generados en hogares, locales comerciales y pequeñas y grandes industrias, los usuarios depositan los residuos en los contenedores sin separación en bolsas plásticas. Después un vehículo recolector de carga lateral o frontal que están distribuidos en zonas de Ambato periódicamente realizan la recolección de los contenedores los cuales son transportados hasta el sitio de disposición final en el relleno sanitario de Ambato sin realizarse la fase de tratamiento.



Figura 11 Diagrama de flujo de los residuos en Ambato
Fuente: Díaz, y otros, 2015

3.4 Clasificación de residuos sólidos domiciliarios y comerciales en la ciudad de Ambato

Los residuos domiciliarios y comerciales fueron analizados en el estudio del municipio de Ambato realizado por (Vilches, 2015) en el año 2015. Se realizó un muestreo en casas y comercios analizando el tipo de residuos sólidos que fueron generados durante siete días para obtener una muestra compuesta y representativa, de la cual se determinó su composición en mezcla con el método del cuarteo. La tabla 3 muestra los resultados de la composición de los residuos domiciliarios comerciales en las siguientes categorías: orgánicos de cocina, textiles, rechazo, otros, orgánicos de jardín, fundas plásticas, papel, cartón, compuestos, plásticos de alta densidad, inertes, botellas pet, polipropileno, poliéster, peligrosos, metálicos ferrosos, electrónicos, metálicos no ferrosos, vidrio, madera.

Tabla 3 Clasificación de residuos domiciliarios comerciales en Ambato en 2015
Fuente: Vilches, 2015

AMBATO	CANTIDADES	
CATEGORIA	Kg	%
Orgánicos de cocina	14,88	36,07
Textiles	4,64	11,23
Rechazo (papel higiénico, pañales)	4,26	10,31
Otros	4,87	11,79
Orgánicos de jardín	1,83	4,44
Fundas plásticas	1,95	4,73
Papel	2,52	6,09
Cartón	1,39	3,35
Compuestos	0,82	1,98
Plásticos de alta densidad	0,7	1,69
Inertes (losa, cerámica, tierra)	1,005	2,44
Botellas PET	0,39	0,94
Polipropileno	0,17	0,43
Poliéster	0,19	0,45
Peligrosos (pilas, baterías, medicamentos)	0,15	0,35
Metálicos ferrosos	0,21	0,49
Electrónicos	0,19	0,45
Metálicos No ferrosos	0,018	0,04
Vidrio	1,14	2,75
Madera menor a 1cm	0	0
PESO TOTAL DE CARACTERIZACIÓN (kg)	41,26	
PORCENTAJE DE CARACTERIZACIÓN	100%	

3.5 Proceso de gestión actual de residuos en Ambato

3.5.1 Barrido

El sistema de barrido de calles y espacios públicos está compuesto por tres grupos de trabajo, los cuales trabajan en distintos horarios las 24 horas del día en turnos del personal de barrido. De acuerdo al diagnóstico realizado por la Empresa Pública Municipal para la Gestión Integral de Desechos Sólidos de Ambato (EPM-GIDSA) se determinó que el sistema de barrido realizado en el año 2012 detectó que existe una cobertura del 78,25% de la ciudad.

El servicio de barrido de calles y espacios públicos tiene un promedio diario de barrido de 4 km lineales de vía por trabajador y por día. En total el servicio de barrido de calles y espacios públicos incluyendo todos los grupos, cubre un total de 355 km lineales de barrido.

3.5.2 Almacenamiento y recolección.

El sistema de almacenamiento se realiza en contenedores de 8m³ donde los usuarios depositan los residuos generados exclusivamente de hogares y locales comerciales. Los contenedores que se encuentran en Ambato tienen una cobertura del 75% en la ciudad, y presentan las siguientes características:

- Contenedor metálico de carga frontal o lateral con una capacidad de almacenaje entre 1700 a 3400 libras
- La fabricación se realiza con materiales reciclables al 100% de tal manera que al final de su vida útil no se convierta en un potencial residuo peligroso.
- Elevada resistencia mecánica.
- Inercia química.
- Elevada resistencia a los cambios térmicos.
- Ausencia de corrosión.



Figura 12 Camión de carga lateral y sistema contenerizado
Fuente: Díaz, y otros, 2015

El sistema de recolección de residuos sólidos municipales cuenta con una planificación por zonas, las mismas que contemplan la recogida de uno o más barrios de acuerdo a la magnitud en extensión

y la cobertura de contenedores, tal y como se explica en la tabla 4, donde se evidencia además la producción de residuos estimada y la población correspondiente.

Tabla 4 Zonas de recolección de residuos urbanos en Ambato.

Fuente: Díaz, y otros, 2015

ZONA	LIMITES	PRODUCCION ESTIMADA	POBLACION ESTIMADA
1	AV. BOLIVARIANA-3 CARABELAS-9 DE OCTUBRE-JOSE GARCIA-AV. LOS CHASQUIS-ORIENTE ECUATORIANO-AZUAY	11,3 TONELADAS DIARIAS	9467 HAB.
2	AV. 12 DE NOVIEMBRE-AV. EL REY-CAMINO EL REY-ESPAÑOLA-AV. BOLIVARIANA-EUGENIO ESPEJO	13,2 TONELADAS DIARIAS	10 502 HAB.
3	AV. RUM9IÑAHUI-AV. LOS CHASQUIS-JOSE GARCIA-NUEVE DE OCTUBRE-AV. LOS ATIS- AV VICTOR HUGO- LOS CHASQUIS-PICHINCHA	7,25 TONELADAS DIARIAS.	10 080 HAB.
4	HUACHI CHICO-LA MAGDALENA-CASIGANA ALTO-FICOA-QUISAPINCHA-VIA GUARANDA	8,9 TONELADAS DIARIAS	5 723 HAB.
5	PISHILATA-LAS VIÑAS-PICAIHUA-PASO LATERAL	7,5 TONELADA DIARIAS	6 943 HAB.
6	PARROQUIAS MONTALVO-HUACHI GRANDE-ORIENTE-PISHILATA	6 TONELADAS DIARIAS	3 046 HAB.
7	PARROQUIAS AUGUSTO MARTINEZ-ATAHUALPA-CANTON PILLARO-PASO	9 TONELADAS DIARIAS	3 500 HAB.
	LATERAL		
10	AV. ATHUALPA-JOSE PERALTA-SANTA ROSA-VIA A TISALEO-QUEBRADA DE TERREMOTO	6,7 TONELADAS DIARIAS	4 378 HAB.
11	PARROQUIAS SANTA ROSA-HUACHI CHICO-PICAIHUA-TOTORAS	5,4 TONELADAS DIARIAS	3 776 HAB.
12	AV. JULIO JARAMILLO-AV. BOLIVARIANA-QUEBRADA DE TERREMOTO-RUBIRA INFANTE	7,7 TONELADAS DIARIAS	3 801 HAB.

13	ATAHUALPA-MARTINEZ-FICOA-LA MAGDALENA	7 TONELADAS DIARIAS	3 500 HAB
14	MONTALVO-TOTORAS-INGAHURCO BAJO-FICOA- MIRAFLORES-MANUELITA	3,2 TONELADAS DIARIAS	2 500 HAB
15	ATOCHA-AV. RODRIGO PACHANO-PASO LATERAL-SANTA ROSA-HUACHI LA MAGDALENA-MANUELITA SANEZ	10 TONELADAS DIARIAS	6 101 HAB.
16	PINLO- LLANGAHUA-AGUAJAN-AV.LOS GUAYTAMBOS-SAN LUIS- ATAHUALPA	10 TONELADAS DIARIAS	6 000 HAB.
17	AV. JULIO JARAMILLO-VIA A TANGAICHE-AV. BOLIVARIANA- CAMINO EL REY	4,5 TONELADAS DIARIAS	5 000 HAB
	AV. INDOAMERICA-EL PISQUE-AV. RODRIGO PACHANO- ATOCHA		
	MIRAFLORES-AV. MANUELITA SAENZ-AV. VICTOR HUGO		
18	LIZARDO RUIZ-HUMBERTO ALBORNOZ-AV. UNIDAD NACIONAL-AV. GONZALES SUAREZ-AV- 12 DE NOVIEMBRE-ESPEJO	17 TONELADAS DIARIAS	7 000 HAB.
19	PEREZ DE ANDA-LIZARDO RUIZ-ELOY ALFARO-CEVALLOS- TOMAS SEVILLA- AV. 12 DE NOVIEMBRE MERA-OLMEDO-FLOREANA-JUAN B. VELA-YAHUIRA	18 TONELADAS DIARIAS	6 500 HAB
20	LA PENINSULA-CASIGANA ALTO-LA MAGDALENA-HUACHI GRANDE-AV. ATAHUALPA-VICTOR HUGO-LAS VIÑAS	20 TONELADAS DIARIAS	8 900 HAB.
21	AV. LOS SHYRIS-MANUELITA SAENZ-VICTOR HUGO- AV ATAHUALPA	13,83 TONELADAS DIARIAS	8 495 HAB.
22	AV. RUMIÑAHUI-PICHINCHA ALTA-AV. LOS ATIS-AV. JULIO JARAMILLO-AV. ATAHUALPA-AV. RUMINAHUI-ATAHUALPA- MARTINEZ- EL SOCAVON	4,79 TONELADAS DIARIAS	9 715 HAB.
23	AV. RODRIGO PACHANO-AV. MIRAFLORES-AV. LOS GUAYTAMBOS-LOS TOCTES-LOS CHAMBUROS-LOS CUMBES- LOS PEPINOS	13,83 TONELADAS DIARIAS	8 495 HAB.

24	LA FLOREANA-YAHUIRA-JOSE OLMEDO-QUIS-QUIS- AV. PICHINCHA- BAJA MANUELITA SAENZ	16,14 TONELADAS DIARIAS	8 905 HAB.
25	ROMULO LOPEZ-RODRIGO PACHANO-CAMINO VECINAL- INDOAMERICA-AV. DE LAS AMERICAS-GONZALES SUAREZ-AV UNIDAD NACIONAL	8,86 TONELADAS DIARIAS	7 768 HAB.
26	AV. ATAHUALPA-TRECE DE ABRIL-TUPAC YUPANQUI- PACCHA-AV. RUMIÑAHUI.	10,52 TONELADAS DIARIAS	4 787 HAB.
27	PINLLO-SANTA ROSA-HUACHI GRANDE-TOTORAS-PILLARO- SAMANGA.UNAMUNCHO	400 KG	7 000 HAB.
28	QUISAPINCHA-FICOA-ATOCHA-ATAHUALPA-PASO LATERAL- EL PISQUE	20 TONELADAS DIARIAS	15 000 HAB.

3.5.3 Tratamiento

No se evidencia ningún tipo de tratamiento de los residuos sólidos previa la disposición final en las celdas del relleno sanitario.

3.5.4 Disposición Final

El relleno sanitario está ubicado en el complejo ambiental Chasinato al noroeste de la ciudad, cuenta con 23,05 hectáreas e inició su operación en el año 2004. El relleno sanitario tiene una proyección de capacidad de almacenamiento de aproximadamente 572218 millones de toneladas. Actualmente recibe residuos sólidos generados en las parroquias urbanas y rurales de Ambato, esto representa aproximadamente un total de 250 ton/día, los residuos están compuestos por un 60% de materia orgánica lo cual genera lixiviados y gas metano. Con estos datos se estimó que para el primer trimestre del pasado 2012 el relleno sanitario llegaría al final de su vida útil, pero con una ampliación en área de disposición final realizando un desbanque de montaña, el relleno opera hasta la actualidad. Todas las celdas tienen un sistema de captación de lixiviados y chimeneas para la eliminación de biogás, Los lixiviados son tratados en la planta de tratamiento. (Díaz, et al. 2015)

El relleno posee las siguientes unidades operativas:

- Recolección de residuos sólidos
- Control de ingreso y pesaje
- Recepción y disposición de residuos sólidos en plataformas

- Captación y tratamiento de lixiviados
- Captación y quema de biogás
- Actividades de mantenimiento y control de las instalaciones



*Figura 13 Relleno Sanitario de Ambato
Fuente: Díaz, y otros, 2015*

Las celdas que se encuentran en el relleno sanitario utilizan el método de celdas – trinchera, las trincheras tienen una profundidad de 12 metros, este método permite dar estabilidad al relleno y minimiza el impacto visual, así como también un aprovechamiento óptimo de las áreas.

El área del relleno es irregular, la zona central es alargada, con un recorrido de este a oeste, los vehículos recolectores ingresan por el control principal, donde se ubica una báscula, una vez que se ha pesado al vehículo ingresa a las diferentes áreas del relleno, donde vuelcan los residuos en la zona de descarga, posteriormente se procede a utilizar un tractor para compactar los residuos de tal manera que se minimiza el asentamiento de las superficies que ya están llenas.

3.5.5 Cantidad de residuos sólidos depositados en el relleno sanitario

A continuación, se muestra la tabla 5 que detalla la cantidad de residuos sólidos que ingresan diariamente al relleno sanitario, de las distintas fuentes de generación esta información corresponde al año 2015 del estudio de (Vilches, 2015) y su nomenclatura en detalle:

1. WDOMCOM: Peso de residuos sólidos domiciliarios y comerciales
2. WBAR: Peso de residuos provenientes del barrido de calles y avenidas.
3. W HOS: Peso de residuos del sector sanitario: clínicas hospitales y centros de salud
4. W CUR: Peso de residuos provenientes de curtiembres y tenerías
5. W MER: Peso de residuos de plazas y mercados
6. W IND: Peso de residuos industriales asimilables a domésticos
7. W PAR: Peso de residuos de usuarios particulares que solicitan la disposición final

Tabla 5: Total de residuos sólidos ingresados en relleno sanitario de Ambato por día
Fuente: Díaz, y otros, 2015

1 (kg)	2(kg)	3(kg)	4(kg)	5(kg)	6(kg)	7(kg)	Σ W generado (kg)	Producción local(ton)
243.738,57	739,09	880,45	19 268	12 137,36	6 875,14	9 729,42	293 368,03	293,37 ton

3.5.6 Cálculo de la fracción orgánica de residuos municipales FORM

El porcentaje de residuos orgánicos en domicilios y comercios corresponde al 40,51% (la suma de orgánicos de cocina y orgánicos de jardín) tal y como se expresa en la tabla 3 *Clasificación de residuos domiciliarios comerciales en Ambato* (Vilches, 2015).

El peso de residuos sólidos domiciliarios comerciales WDOMCOM se multiplicó por 40,51% para obtener en unidad de peso (kilogramos) los residuos netamente orgánicos de casas y comercios.

El peso de residuos de plazas y mercados WMER es netamente material orgánico y tiene un peso de 12 137,36 kg/día.

La fracción orgánica de residuos municipales (FORM) de Ambato se ha calculado como la suma de los residuos orgánicos de casas y domicilios y el peso de plazas y mercados en kilogramos. A continuación, se muestran los cálculos referidos:

40,51% del peso de residuos domiciliarios comerciales (WDOMCOM):

$$\frac{243.738,57 \text{ kg}}{x} \frac{100\%}{40,51\%} = 98738,49 \text{ kg de WDOMCOM/día}$$

$$FORM = WDOMCOM + WMER$$

$$98738,49 \text{ kg} + 12137,36 \text{ kg} = 110875,85 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} = 110,85 \text{ ton FORM/día}$$

Toneladas anuales de FORM:

$$\frac{110875,85 \text{ kg}}{\text{día}} \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \frac{365 \text{ día}}{1 \text{ año}} = 40469,68 \frac{\text{ton FORM}}{\text{año}}$$

3.5.7 Tratamiento de lixiviados

La planta de tratamiento de lixiviados se construyó como una alternativa de solución para el tratamiento de este efluente de elevada carga contaminante. La planta se diseñó para tratar 2,1 m³/h, conformado por cinco etapas:

1. Tratamiento primario mecánico, rejilla para desbaste, eliminación de sólidos gruesos y sedimentales por intercepción.

2. Tratamiento biológico en un digestor anaeróbico de flujo ascendente y un biofiltro percolador aeróbico.
3. Tratamiento mecánico en un tanque de clarificación, tratamiento cuaternario químico consistente en un sistema de floculación.
4. Tratamiento mecánico en un lecho de secado.
5. Tratamiento químico con cloración.

En la planta de tratamiento de lixiviados se utilizan reactivos de coagulación-floculación, desinfección y nutrientes: ácido fosfórico, sulfato de aluminio, cal, hipoclorito de calcio. Además, se realiza la inoculación de bacterias en el filtro anaerobio de flujo ascendente con rumen de reces del matadero municipal. El lixiviado tratado en las diferentes fases se almacena en una piscina de oxidación (impermeabilizada con una membrana) previo su descarga. En la figura 14 se indica el diagrama de flujo de la planta de tratamiento de lixiviados.

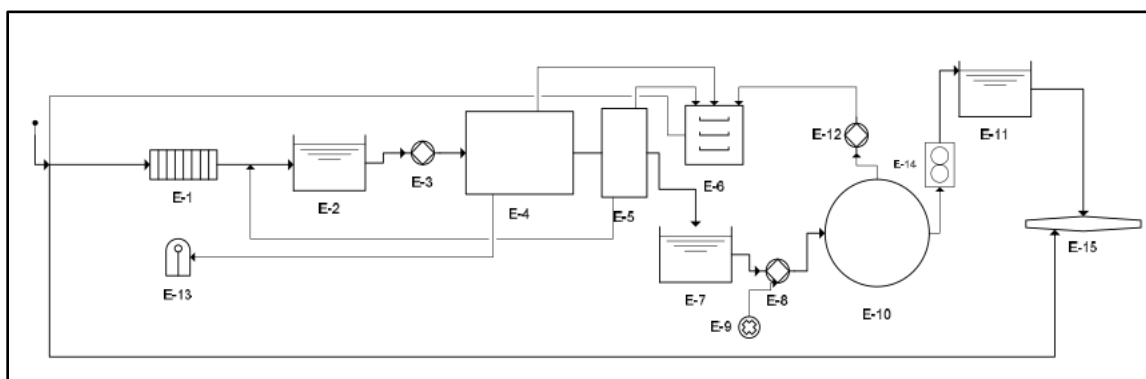


Figura 14 Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de lixiviados
 Fuente: Díaz, y otros, 2015

La tabla 6 muestra los componentes de la planta de lixiviados, la descripción de su función individual dentro del sistema y la capacidad hidráulica de cada componente.

Tabla 6 Componentes de la planta de lixiviados
 Fuente: Díaz, et al, 2015

Número	Unidad	Función	Capacidad
E – 1	Rejilla	Retención de sólidos gruesos, solidos sedimentables y arenas	2 m ³
E – 2	Tanque 1	Almacenamiento temporal de lixiviados para posterior bombeo	2,25 m ³
E – 3	Bomba 1	Transporte de lixiviado del tanque 1 al digestor, implementando la	2 hp

		dosificación de ácido fosfórico para regular el pH	
E – 4	Digestor UASB	Tratamiento anaerobio permite la coagulación y eliminación de sólidos coloides no sedimentables	36 m ³
E – 5	Biofiltro FBP	Estabilización de la materia orgánica, posee un biofilm que descontamina los componentes biológicos	19 m ³
E – 6	Lecho de secado	Deshidratar lodos provenientes de la rejilla, del UASB, del FBP y del tanque de clarificación	3 m ³
E – 7	Tanque 2	Almacenamiento temporal de lixiviado para posterior bombeo	2,25 m ³
E – 8	Bomba 2	Transportar el lixiviado del tanque 2 al tanque clarificador	1 HP
E – 9	Tanque dosificador	Imprime la dosis adecuada de coagulante previamente establecida en el laboratorio (8 kg de sulfato de aluminio en 1 m ³ de agua) dosificando aproximadamente cada hora y media	500 L
E – 10	Tanque clarificador	Provoca la agregación de pequeñas partículas aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar su sedimentación por gravedad mediante el uso de sulfato de aluminio generando flóculos que se sedimentan	27 m ³

		en el fondo del tanque formando lodos	
E – 11	Tanque de cloración	Elimina microorganismos patógenos con una dosis de 5 kg de hipoclorito de calcio en 550 litros de agua, esto desinfecta el lixiviado	3 m ³
E – 12	Bomba 3	Conduce los lodos generados en el tanque clarificador al lecho de secado	1 HP
E – 13	Tanque quemador de biogás	Quema de biogás producido por el UASB	20 mbar
E – 14	Medidor de caudal	Indica cuanto lixiviado se descarga	-----
E – 15	Tubo de descarga / Piscina de oxidación	Conduce el lixiviado tratado a la piscina de oxidación permitiendo que el lixiviado tenga mayor aireación y a su vez para almacenamiento y posterior reutilización en el relleno sanitario	200 mm

4 Proyección a futuro del manejo de la gestión de residuos en Ambato

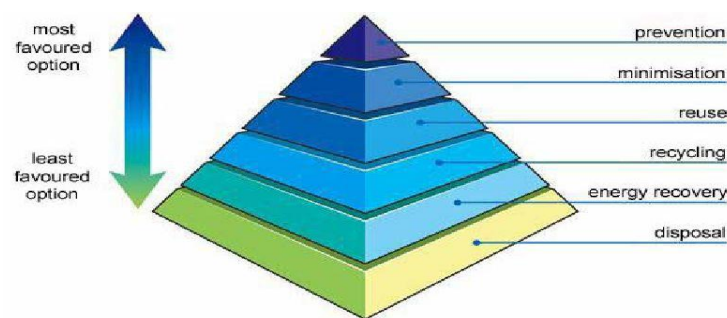
En el marco de la legislación ambiental ecuatoriana los municipios tienen la competencia intransferible en el manejo de los desechos sólidos otorgados en el código orgánico de organización territorial autonomía y descentralización. Ver título 2.3.2.

Las metas iniciales definidas por el programa nacional para la gestión integral de desechos sólidos contemplaban el que un 70% de la población del Ecuador disponga sus desechos en un relleno sanitario técnicamente manejado hasta el año 2014. El avance de esta meta se vio reflejado en las estadísticas de la figura 5: Métodos de disposición final en Ecuador.

Anteriormente el programa había iniciado una nueva etapa que suponía la ampliación del plazo de ejecución hasta el 2017, año para el cual el objetivo fue eliminar los botaderos a cielo abierto de todos los municipios del país.

En un horizonte próximo se proyecta que en Ecuador se implementen todas las fases de la gestión integral de residuos sólidos, se enfoque la reducción de la generación y separación en la fuente de origen, aprovechamiento energético, reciclaje y la correcta eliminación de residuos peligrosos, cumpliendo la jerarquización en el ciclo de vida de un residuo tal y como se muestra en la pirámide de jerarquización en la figura 15 donde se detallan las opciones más favorables que debe optar la eliminación de un residuo ubicándose en la punta de la pirámide y las menos favorables en la base.

En este contexto un usuario responsable deberá: evitar comprar bienes innecesarios, de no ser posible minimizar sus compras, reutilizar los artículos antes que desecharlos, reciclar productos que sean factibles, recuperar energéticamente aquellos que tengan capacidad de generar energía, y finalmente de no ser posible realizar todas las acciones anteriores, eliminar en el sitio adecuado de disposición final garantizando su estabilización.



*Figura 15 Jerarquización del manejo de residuos sólidos
Fuente: (Casas Sabata, et al, 2005)*

4.1 Recolección diferenciada y separación en la fuente

4.1.1 Separación en la fuente

De acuerdo al art. 12 de la ordenanza para el manejo de residuos sólidos de Ambato son obligaciones de los ciudadanos: Clasificar los residuos comunes desde la fuente, de acuerdo a los programas de reciclaje implementados por el municipio de Ambato, para cumplir con la responsabilidad de separación en la fuente. Para lo cual proponemos el siguiente sistema para separar la fracción orgánica de los residuos reciclables en hogares y comercios:

4.1.2 Campaña de difusión y capacitación a la ciudadanía en un barrio piloto en Ambato

El modelo para implementar la recolección diferenciada de residuos sólidos en Ambato esta descrito a continuación en 4 fases que tienen como objetivo trabajar directamente con un barrio piloto, bien organizado y representativo de los habitantes de Ambato:

FASE I.- Selección de Parroquia piloto

El criterio de selección de la parroquia o barrio piloto está basado en la organización y aceptación de la ciudadanía a diferentes proyectos implementados por la municipalidad de Ambato, además se ha escogido al barrio con mayor generación de residuos y por lo tanto con mayor número de contenedores por zona de recolección en este contexto la parroquia con mayor generación de residuos es la parroquia la Península con un total de 20 toneladas diarias y con 8900 habitantes. Ver tabla 3 y mapa de parroquias de Ambato en fig. 16.



Figura 16 Mapa de parroquias de Ambato

Fuente: (Vilches, 2015)

1.Ambatillo 2. Atahualpa 3. Augusto N. Martínez 4. Constantino Fernández 5. Cunchibamba 6. Huachi Grande 7. Izamba 8. Juan Benigno Vela 9. Montalvo 10. Picahua 11. Pasa 12. Pilahuín 13. Quisapincha 14. Pinllo 15. San Fernando 16. Santa Rosa 17. Totoras 18. Unamuncho 19. Atocha 20. Celiano Monge 21. Huachi Chico 22. Huachi Loreto 23. Matriz 24. La Merced 25. La Península 26. Pishilata 27. San Francisco

FASE II: Planificación del programa de capacitación en recolección selectiva

En primera instancia se realizarán varios acercamientos formales de identificación e interacción con los actores sociales barriales relevantes para dar a conocer los objetivos y beneficios del programa piloto de reciclaje.

La empresa pública municipal para la gestión integral de desechos sólidos de Ambato EMP-GIDSA coordinará las siguientes actividades:

- Capacitación al personal de EPM-GIDSA que participarán en la aplicación de encuestas y levantamiento de información.
- Talleres de capacitación impartidos por EPM-GIDSA para los habitantes del barrio piloto seleccionado
- Entrega de información (trípticos, banners, etc.) a los habitantes del barrio piloto.

- Evaluación y seguimiento a los habitantes del barrio para confirmar los resultados de la capacitación.

FASE III Operación del sistema de recolección selectiva


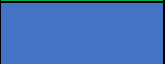


La recogida selectiva en contenedores de superficie consiste en colocar en la vía pública contenedores de diferentes tipos, dependiendo de las características de la fracción que haya que recoger, y que posteriormente los ciudadanos utilizan para depositar sus residuos. Periódicamente, los contenedores se vacían siguiendo frecuencias adaptadas a la generación y características de cada fracción de residuos. (Agencia de Residuos de Catalunya, 2018)

En Ambato la recolección de residuos se realiza tal y como se explica en el numeral 4.3 en el Título almacenamiento y recolección. Para el plan piloto en el barrio La Península los contenedores diferenciados (ver fig. 17) serán ubicados en el mismo sitio donde se ubicaban anteriormente los contenedores tradicionales, esto para que las rutas de recolección no se vean afectadas y los usuarios no se vean afectados en la habitual rutina de llegar a ellos. Los contenedores diferenciados tienen el siguiente diseño y por color se ha definido de acuerdo a la norma INEN, 2014. Ver tabla 7.



Figura 17 Contenedor para residuos municipales
Fuente: Interempresas, 2018

Tabla 7 Colores estandarizados para contenedores de residuos
Fuente: INEN, 2014

Tipo de Residuo	Color del Recipiente		Descripción del Residuo	Clasificación del Catálogo de Catalunya
Orgánicos	Verde		Restos de comida, residuos vegetales.	No Especial
Reciclables	Azul		Papel, cartón, plástico, vidrio, metálicos	No Especial
No reciclables asimilables a domésticos	Negro		Residuos no reciclables asimilables a domésticos	Inerte
Peligrosos	Rojo		Residuos con características de CRETIB	Especial

FASE VI: Seguimiento y Evaluación

Se harán monitoreos semanales para confirmar la aceptación de la ciudadanía a los nuevos contenedores y la actividad de separación de residuos en hogares. Las estrategias serán encuestas valoradas y verificación constante del contenido de los contenedores diferenciados. Los contenedores diferenciados estarán ubicados junto a los contenedores tradicionales y deberán llevar un registro en peso de la cantidad de residuos recolectados semanal y mensualmente para verificar el avance en la ejecución del programa.

4.2 Valoración y Tratamiento

De acuerdo a la clasificación de residuos en tabla 3: Ambato clasificación de residuos domiciliarios y comerciales de Vilches, 2015 y tomando como referencia al catálogo de residuos de Catalunya se propone el siguiente esquema para valorizar y tratar las fracciones de residuos que han sido identificados en la ciudad de Ambato de forma cualitativa:

Tabla 8 Valorización y tratamiento de residuos para Ambato
Fuente: Agencia de Residuos de Catalunya, 2018

Código	Descripción	Origen	Clasificación	Valorización	Tratamiento y Disposición del residuo
200101	Orgánicos	Casas y comercios	No Especial	Compostaje	Incineración de residuos no halogenados // Disposición de residuos no especiales
200112	Textiles	Casas y comercios	No Especial	Reciclaje de textiles	Disposición de residuos no especiales // Incineración de residuos no halogenados
200103	Plásticos	Casas y comercios	Inerte	Reciclaje de plásticos	Incineración de residuos no halogenados // Disposición de residuos inertes
200101	Papel y Cartón	Casas y comercios	No especial	Reciclaje de papel y cartón	Incineración de residuos no halogenados// Disposición de residuos no especiales
200121	Inertes (losa, cerámica. Tierra)	Casas y comercios	Inertes	Utilización en la construcción	Disposición de residuos inertes// Disposición en escombreras
200120	Medicamentos	Casas y comercios	No Especial	Recuperación de medicamentos	Incineración de residuos no halogenados// Estabilización//Disposición de residuos no especiales
200118	Pilas y baterías	Casas y comercios	Especial	Recuperación de pilas, baterías y acumuladores	Estabilización
200105	Metálicos ferrosos y chatarra	Casas y comercios	Inerte	Reciclaje y recuperación de metales y compuestos metálicos	Disposición de residuos inertes

200102	Vidrio	Casas y comercios	Inerte	Reciclaje de vidrio	Disposición de residuos inertes
160110	Electrónicos	Casas y comercios	Inerte	Reciclaje y recuperación de metales y compuestos metálicos	Disposición de residuos inertes
200108	Madera	Casas y comercios	No especial	Reciclaje y reutilización de madera// Utilización como combustible	Incineración de residuos no halogenados// Disposición de residuos no especiales

5 Estado del arte

La búsqueda de información bibliográfica sobre el tratamiento de residuos municipales, nos llevó a encontrar artículos científicos actuales en bases de datos de la Universidad Politècnica de Catalunya en revistas de alto impacto. Se realizaron búsquedas avanzadas con palabras clave y filtrando en categorías aquellas revistas que publiquen artículos sobre tratamiento de residuos de los últimos años que hayan sido citados varias veces por diferentes autores. Encontrando los siguientes estudios importantes sobre el tema:

5.1 La producción de hidrógeno por fermentación oscura de los residuos sólidos municipales y los residuos de mataderos: un proceso de dos fases

En el trabajo de (Gómez et al. 2006) un proceso de fermentación de dos fases para el tratamiento de desechos, destinado a la recuperación de hidrógeno para uso energético, fue investigado en su fase de fermentación inicial. La producción de hidrógeno se obtuvo a partir de un cultivo mixto basado en un inóculo mesófilo activo sin que se aplicara ningún tratamiento selectivo. El sustrato utilizado fue una mezcla no esterilizada de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y los residuos del matadero de una planta de procesamiento de aves de corral.

Cuatro reactores fueron empleados para el estudio. De estos, dos fueron para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales con tiempos de retención hidráulico de 3 y 5 días. Estos reactores tuvieron una denominación. Los otros dos reactores trataron la mezcla de residuos orgánicos y desechos de mataderos con una denominación diferente, teniendo los mismos tiempos que el par anterior.

La incorporación de una unidad de recuperación de hidrógeno en el proceso tradicional anaerobio de tratamiento de residuos parece apropiada, ya que la producción estable de hidrógeno se logró utilizando microflora anaeróbica mesófila activa como inóculo, sin aplicar ningún tipo de pretratamiento. No fue necesaria la esterilización previa de los residuos utilizados como alimentación. Estas dos características hacen que el proceso sea atractivo para la aplicación a gran escala, gracias a la existencia de sistemas bifásicos que podrían producir hidrógeno para su uso en sistemas de pilas de combustible. La fase metanogénica unida a un sistema de producción de hidrogeno permite la estabilización de los desechos en un tiempo razonable.

5.2 Impacto en los recursos de los sistemas municipales de tratamiento de residuos sólidos en las ciudades chinas según la evaluación híbrida del ciclo de vida

Este estudio realizado por (Zhao et al. 2018) ha evaluado los impactos ambientales de los sistemas de tratamiento de residuos sólidos urbanos en las ciudades de China y se basaron en la evaluación híbrida del ciclo de vida (Life Cycle Assessment). Los impactos de los recursos en este estudio incluyen operaciones de extracción de biomasa (productos agrícolas y forestales), combustibles fósiles (carbón crudo, petróleo crudo y gas natural) y minerales (minerales de metales ferrosos, minerales de metales no ferrosos, y minerales de tallic). Se comparan seis sistemas típicos de tratamiento de residuos sólidos urbanos en ciudades chinas: vertederos, rellenos sanitarios con utilización de vertederos, inhalación de lixiviados, compostaje + vertederos, compostaje + incineración e incineración con tratamiento centralizado de lixiviados.

Los resultados muestran que el compostaje y la incineración tienen los menores impactos sobre los recursos, excepto en la extracción de carbón crudo. La reutilización de subproductos de los sistemas de tratamiento de RSU puede reducir la extracción de recursos de toda la economía. (Zhao et al. 2018)

5.3 Recuperación de energía de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales: una evaluación de instalaciones basada en opciones reales

La digestión anaeróbica es un tratamiento adicional al compost de la fracción orgánica de residuo, que produce ambos un buen fertilizante y biogás. A la luz de esto (Ranieri et al. 2018) como objetivo de estudio pretende investigar cómo pueden funcionar las diferentes tecnologías desde el punto de vista técnico, económico y financiero, en presencia de una fracción orgánica incierta. Dos configuraciones de tratamiento anaerobio fueron puestas a evaluación: un proceso en continuo denominado Dranco, y un proceso en batch o discontinuo denominado Bekon.

Los procesos por lotes (discontinuo) están diseñados para ser simples, pero el rendimiento del biogás no es estable. En consecuencia, algunos proveedores de tecnología como Bekon operan una gama de digestores en paralelo. Esto proporciona una gran flexibilidad en la capacidad de este tipo de planta.

De los datos obtenidos en la simulación se muestra que, en este caso, Bekon es más conveniente que Dranco. La probabilidad que el valor presente neto de Bekon sea positivo es del 55%, mientras que en el caso de la tecnología Dranco es del cercano 7%. Esto puede ser explicado observando que la capacidad de la planta Bekon puede encajar la curva de la fracción orgánica mejor que Dranco que presenta una muy alta sobrecapacidad para los primeros años. En otras palabras, contrariamente al proceso Dranco, el proceso Bekon tiene la flexibilidad de adaptar su capacidad de evolución de la fracción orgánica si fuera el caso. (Ranieri et al. 2018)

5.4 La digestión anaeróbica como fuente de energía sostenible: una dinámica enfoque para mejorar la recuperación de desechos orgánicos

En el presente trabajo de (Ragazzi et al. 2017), la viabilidad de una planta de digestión anaerobia en un contexto con muy bajas tasas de recolección selectiva es analizado. Este trabajo pretende sugerir un posible sistema único capaz de tratar, a través del proceso de digestión anaerobia, tanto los residuos sólidos municipales residuales denominados RSMR como la fracción orgánica de residuos municipales y sus siglas FORM, provenientes de un proceso de recogida selectiva en constante evolución, sin tener que operar cambios sustanciales en la estructura de la planta durante los años.

La solución propuesta se basa en la utilización de reactores discontinuos. La mayoría de ellos se cargarán con residuos sólidos municipales residuales durante el primer período. Posteriormente, se convertirán al tratamiento de desechos putrescibles separados por fuentes siempre que recogida selectiva aumente. A través de esta solución, no hay necesidad de cambiar la cantidad total de reactores.

La planta teórica objeto de este estudio procesa todos los residuos provenientes de los municipios y considerando cuatro pasos de recogida selectiva (10%, 25%, 50% y 75%). El supuesto es que el sistema de recogida finalmente reúne el 75% de la fracción putrescible y logra la cadena de reciclaje del 75% con un 38% de recogida selectiva cubierto por la separación de la fracción putrescible. Mediante la adopción de un proceso dinámico de digestión anaeróbica en reactores discontinuos, el biogás producido aumenta del 21% al aumentar el porcentaje de recogida selectiva 10% al 75%, lo que hace que el sistema sea más rentable desde el punto de vista energético.

Además, para los primeros tres escenarios se ha sugerido una condición termófila mientras que una mesófila para el 75% de recogida selectiva. Como resultado, el 75% permite ahorrar energía debido a los bajos requisitos de calefacción, así como a mejorar los ingresos económicos. Las plantas de digestión anaerobia discontinuas, como la presentada aquí, podrían ser de gran importancia para todos los países, o las regiones, que todavía se enfrentan a una situación de emergencia en el proceso de tratamiento de residuos y desean no solo encontrar una solución para evitar la eliminación de material putrescible en vertederos, sino también para mejorar la separación de los desechos en la fuente (Ragazzi et al. 2017).

6 Objetivos

Estudiar la factibilidad de implementar un sistema de tratamiento de digestión anaerobia para la fracción orgánica de desechos municipales de la ciudad de Ambato-Ecuador.

Cuantificar teóricamente el número de biorreactores capaces de tratar la fracción orgánica de residuos sólidos municipales de Ambato considerando tasas de recolección selectiva.

Calcular la cantidad de biogás generada en el proceso de digestión anaerobia de las fracciones de residuos sólidos.

Diseñar un biorreactor para tratamiento de residuos orgánicos municipales para la ciudad de Ambato Ecuador.

7 Fundamento teórico de la digestión anaerobia de residuos

7.1 Digestión Anaerobia

La descomposición anaerobia (en ausencia total de oxígeno o nitratos) de la materia orgánica produce un gas combustible. Este gas contiene una alta proporción en metano (CH_4 en concentración superior al 60 % en el gas), con una potencia calorífica inferior del orden de 5500 Kcal/m³, y se designa usualmente como biogás. Todo proceso de digestión anaerobia lleva parejo una eliminación/depuración de la carga orgánica y la producción de este gas. Las instalaciones especialmente diseñadas para optimizar este proceso se designan como “digestores de metano”, “plantas de biogás” o simplemente “reactores anaerobios”.(Campos, et al. 2012)

7.1.1 Fases de la fermentación anaerobia

La digestión anaerobia se caracteriza por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos), interviniendo diversas poblaciones de bacterias. Ver Figura 18

- Hidrólisis

En la primera etapa los compuestos orgánicos complejos, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono son transformados por enzimas extracelulares en productos solubles y fácilmente degradables, como azúcares, aminoácidos, alcoholes, etc. El grupo de bacterias que actúa en esta primera etapa son las bacterias hidrolíticas acidogénicas (1 en figura 18). La actividad hidrolítica tiene una importancia significativa en residuos de alto contenido orgánico y puede convertirse en la fase limitante del proceso. Algunos métodos industriales mejoran la hidrólisis con el uso de agentes químicos.

- Acidogénesis

Las mismas bacterias degradan los productos obtenidos en la hidrólisis, produciendo ácidos grasos volátiles (ácidos propiónicos, butírico y valérico), ácido acético (CH_3COOH), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). (Verma, 2002)

- Acetogénesis

En esta etapa los compuestos intermedios se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono gracias a la actividad de las bacterias acetogénicas (2 en figura 18). La descomposición anaerobia de los ácidos propiónico y butírico no es termodinámicamente posible para presiones parciales del hidrógeno relativamente elevadas, y por lo tanto es necesaria la presencia de poblaciones bacterianas capaces de eliminar el hidrógeno generado en esta etapa. El hidrógeno puede ser consumido por bacterias metanogénicas hidrogenófilas (4 en figura 18) y también por bacterias homoacetogénicas (3 en figura 18), capaces de producir ácido acético a partir de hidrógeno y dióxido de carbono.

- Metanogénesis

La cuarta y última etapa conlleva la transformación bacteriana del hidrógeno y el ácido acético producidos en las etapas anteriores en metano y dióxido de carbono. Se distinguen dos tipos de bacterias, las metanogénicas acetoclásticas (5 en figura 18) que transforman el acetato en metano, y las metanogénicas hidrogenófilas que convierten el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano. Aproximadamente el 70 % del metano producido en esta etapa se genera por medio de las bacterias acetoclásticas, y el 30 % restante gracias a las hidrogenófilas. Normalmente, las bacterias metanogénicas tienen un crecimiento más lento que las bacterias de las etapas anteriores, por lo que su crecimiento tiende a ser la etapa limitante del proceso, sin embargo, para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas. (Verma, 2002)

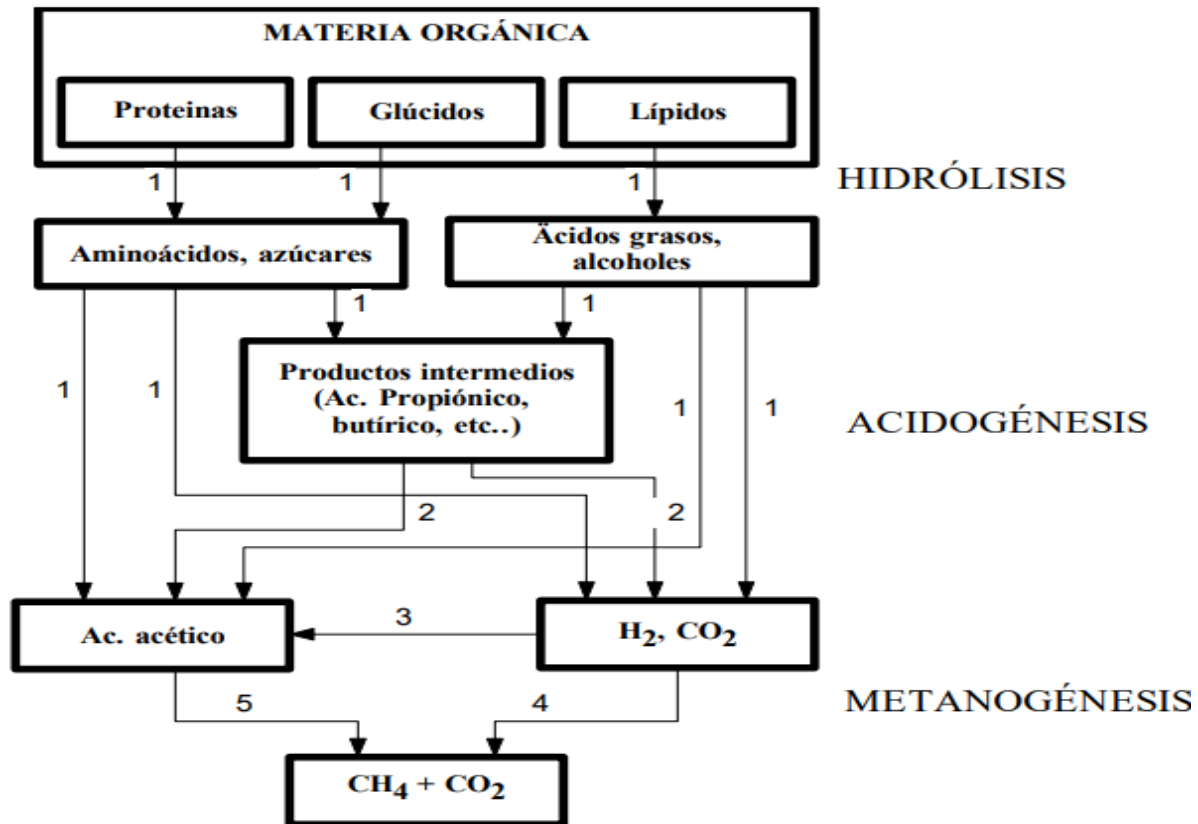


Figura 18 Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas
1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Fuente: Elías, y otros, 2012

7.2 Digestión anaerobia para tratar la fracción orgánica de desechos sólidos municipales

Los residuos sólidos urbanos son comúnmente desechados a vertederos que afectan la sostenibilidad ambiental mediante la liberación de contaminantes como lixiviados y gases de efecto invernadero, generados por las altas cantidades de desechos putrescibles que aumentan el potencial de contaminación de los sitios. Al mismo tiempo, la fracción orgánica se puede considerar como una fuente de energía y fertilizante ya que los tratamientos biológicos, en particular la digestión anaeróbica es una forma viable de tratar y explotar la fracción orgánica de residuos municipales y los lodos de aguas residuales para procedimientos de co-digestión.

Con respecto al proceso aeróbico, que genera aire agotado compuesto principalmente por CO_2 , NH_3 , H_2O , O_2 y N_2 , y una fracción sólida (compost), la principal ventaja de digestión anaerobia está relacionada con el proceso de recuperación de energía. De hecho, el procedimiento anaeróbico genera metano que puede usarse para producir energía eléctrica. Un metro cúbico de biogás puede generar una energía eléctrica de 2,5 kWh, mientras que los desechos putrescibles pueden generar unos 128 m³ t⁻¹ de biogás, lo que resulta en la producción de 150-300 kWh de energía eléctrica por tonelada de desechos tratado.

Por el contrario, el compostaje aeróbico requiere 30-35 kWh de energía por entrada de tonelada. Si bien el costo de inversión para digestión anaerobia es 1,2-1,5 veces mayor que el compostaje aeróbico, la explotación energética asociada al primer proceso lo hace más atractivo. En este marco, los incentivos económicos en la producción de energía juegan también un papel importante. De hecho, diferentes compañías trabajando en el sector agrícola, la industria alimentaria y la ganadería se están moviendo hacia la digestión anaerobia para la producción de energía. La misma situación se puede notar con respecto a la fracción orgánica de los desechos municipales. (Ragazzi et al. 2017)

7.3 Parámetros ambientales y operacionales del proceso

7.3.1 pH y alcalinidad

En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado: hidrolíticos entre 7,2 y 7,4; acetogénicos entre 7 y 7,2 y metanogénicos entre 6,5 y 7,5. En el mantenimiento del pH es de vital importancia el sistema formado por las diferentes formas del carbono inorgánico, en equilibrio dióxido de carbono, bicarbonato, carbónico. En algunas aguas residuales con bajo poder tampón puede llegar a ser necesario controlar exteriormente el pH, a fin de evitar su bajada debida a los ácidos generados en la segunda fase. No es así para los residuos orgánicos complejos, como los ganaderos o los municipales, para los cuales su alta alcalinidad permite una autorregulación permanente del pH. Las mezclas de diferentes residuos pueden permitir controlar la alcalinidad necesaria. Se admite que una alcalinidad comprendida entre 2 y 3 g CaCO_3/L es suficiente para la autorregulación del pH en el reactor. (Elias, et al., 2012)

7.3.2 Potencial redox

Debe ser suficientemente bajo para asegurar el desarrollo de poblaciones metanogénicas estrictas. Las bacterias metanogénicas requieren potenciales de oxidación-reducción inferiores a -300 mV.

7.3.3 Nutrientes

En el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1. Valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción y valores muy superiores crean problemas de inhibición. Para el fósforo la relación óptima es C/P = 150/1. Valores inferiores no crean problemas de inhibición. En general, los residuos ganaderos, los lodos o la FORM

no presentan problemas por falta de nutrientes. A continuación, en la tabla 9 se muestran valores promedio de la relación C/N.

*Tabla 9 Valores promedio aproximados de la relación carbono nitrógeno de residuos orgánicos disponibles en el medio rural
Fuente: Varnero, 2011*

Materiales	%C	%N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1,30	25:1
Equinos	40	0,8	50:1
Ovinos	35	1	35:1
Porcinos	25	1,5	16:1
Caprinos	40	1	40:1
Conejos	35	1,5	23:1
Gallinas	35	1,5	23:1
Patos	38	0,8	47:1
Pavos	35	0,7	50:1
Excretas humanas	2,5	0,85	3:1
Residuos vegetales			
Paja trigo	46	0,53	87:1
Paja cebada	58	0,64	90:1
Paja arroz	42	0,63	67:1
Paja avena	29	0,53	55:1
Rastrojos maíz	40	0,75	53:1
Leguminosas	38	1,50	28:1
Hortalizas	30	1,8	17:1
Tuberculosis	30	1,5	20:1
Hojas secas	41	1	41:1
aserrín	44	0,06	730:1

7.3.4 Temperatura

El proceso de digestión anaerobia puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura: psicrófilo: por debajo de 20°C; mesófilo, entre 30° y 40 °C; termófilo, entre 50° y 70°C. Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento de las bacterias y con esto la velocidad en la producción de biogás. También disminuye la viscosidad, lo que puede permitir un menor consumo energético para bombeo y agitación. Trabajando en el rango termofílico se asegura, además, la destrucción de patógenos, la eliminación de malas hierbas y de huevos y larvas de insectos, por lo cual presenta interés para el tratamiento de residuos que han de ser aplicados al suelos y cultivos que requieran un cierto grado de higienización. (Elias, et al., 2012)

7.3.5 Toxicidad e inhibición

Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoníaco libre o el ácido sulfhídrico son inhibidores de importancia de las bacterias metanogénicas. Estos compuestos presentan una inhibición de tipo reversible. Los metales pesados también son inhibidores, o tóxicos a altas concentraciones (ver Tabla 10).

Tabla 10 Concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia
Fuente: Elias, et al., 2012

Metal	Concentración de inhibición (mg/L)	Límite de toxicidad (mg/L)	Concentración para 50% inhibición (mg/l)
Ref.	Hayes y Theis (1978)		Lawrance y Mc Carty (1965)
Cr (III)	130	260	
Cr (VI)	110	420	
Cu	40	70	211
Ni	10	30	134
Cd	-	20	
Pb	340	340	
Zn	400	600	136

Las concentraciones a partir de las cuales el amoníaco libre es un inhibidor no están definidas nítidamente. Así, mientras unos autores proponen el valor de 200 mg N/L, otros proponen el de 700 mg N/L. Las diferencias que se encuentran sobre este valor en la bibliografía son debidas a aclimatación de las bacterias y al hecho que la concentración de amoníaco libre depende del pH y la temperatura.

7.3.6 Agitación /mezclado

Hay diferentes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio de digestión:

- Mezclado del sustrato de alimentación con el sustrato de digestión
- Distribución uniforme de calor para mantener una distribución uniforme de temperaturas
- Evitar la formación de espumas o la sedimentación
- Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato.

La potencia necesaria para cubrir la demanda energética de la agitación varía en función del volumen y la forma del digestor, y de las características del residuo. Se encuentran valores comprendidos entre 10 y 100 W·h/m³·día. Usualmente se recomiendan valores superiores a 30 W·h/m³·día.

7.3.7 Otros parámetros

Otros parámetros, tales como tiempo de retención o velocidad de carga orgánica, dependen del tipo de reactor adoptado, de las características del sustrato y de aspectos cinéticos, los cuales serán discutidos en los apartados posteriores. (Elias, et al., 2012)

7.3.8 Sólidos totales y volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medidas que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. (Varnero Moreno, 2011). La tabla 11 muestra los contenidos típicos de sólidos y sustancias orgánicas y los rendimientos de biogás para la mayoría frecuentes desechos orgánicos, tratados con digestión anaeróbica:

8 Caso de Estudio

Este trabajo propone establecer un sistema de tratamiento para la fracción orgánica de residuos municipales en la ciudad de Ambato, a través de la propuesta de diseño de una planta de digestión anaerobia que sea flexible a tratar fracciones de recogida selectiva que van en aumento con el paso del tiempo.

8.1 Criterios de selección del sistema de tratamiento de residuos orgánicos municipales

La evaluación de impactos que generan los sistemas municipales de tratamiento de residuos sólidos obtuvo como resultado que, la digestión anaerobia es el método con menor impacto en los recursos (Zhao et al. 2018). Por otra parte, se evaluó las instalaciones basadas en opciones reales para la recuperación de energía de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales determinándose que la configuración en discontinuo tiene buenos resultados según (Ranieri et al. 2018). Ver tabla 11.

Tabla 11 Criterios de selección de reactor para tratamiento de residuos orgánicos
Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia					
Tratamiento	Digestión aerobia (Compost)	Digestión anaerobia (Metanización)	Incineración	Disposición controlada (vertedero)	Bibliografía (Zhao et al. 2018)
		X			
Configuración del digestor	Continuo	Continuo 2 etapas	Discontinuo		Bibliografía (Ranieri et al. 2018)
			X		

8.2 Cálculo teórico del tonelaje de residuos para digestión anaerobia

Para el cálculo del tonelaje de residuos sólidos para digestión anaerobia se asumieron datos del estudio de (Ragazzi et al. 2017):

Se consideraron 4 escenarios posibles de recolección selectiva, para lograr la separación de residuos domiciliarios comerciales de Ambato (tabla 3) en orgánicos (objeto de estudio), e inorgánicos (material reciclable), el desarrollo de esta separación va en aumento progresivo (10%,25%,50% y 75%) partiendo de que todos aquellos residuos están en mezcla en los contenedores sin diferenciación como es el caso actual de Ambato.

La fracción orgánica en Ambato representa el 40,51% lo que representa que llegar al 100% de recolección selectiva nos permitiría aprovechar este porcentaje neto de materia orgánica en peso; el restante 59,49% es material inorgánico (reciclable).

El tonelaje digestible fue calculado en base a un esquema propuesto en el estudio de (Ragazzi et al. 2017) pero el cual fue adaptado para este caso de estudio, con datos de cantidades de residuos sólidos de Ambato en el estudio de (Vilches, 2015) lo cual resultó la figura 19 y viene explicado de la siguiente manera:

- Inicialmente los biorreactores se cargarán de residuos sólidos municipales residuales (RSMR) que son parte de los residuos municipales (RSM) generados en Ambato, y son aquellos residuos de domicilios y comercios (tabla 3) que en mezcla tienen fracción orgánica

proveniente de casas, comercios y mercados, de interés para digestión anaerobia, y material inorgánico (reciclable).

- Antes de alimentar los biorreactores se propone una operación de cribado a través de una malla de 80 mm para los residuos sólidos municipales residuales RSMR con los cuales serán llenados los biorreactores en primera instancia. El residuo de cribado bajo el tamiz alcanza el 41% del total cribado, es decir todo residuo que alcanza a tamizarse. Esta operación radica en que un material fino es más fácil de biodegradar, y este material cribado a su vez tiene un contenido de material orgánico del 64% debido a que hemos explicado que los RSMR son residuos sin separación de materia orgánica e inorgánica. Por lo tanto, el residuo que ingresa al biorreactor corresponde a multiplicar el residuo sólido municipal residual por 0,64 y por 0,41 restando el porcentaje de recolección selectiva que fue propuesto en este estudio (10%,25%,50%,75%).
- El 59% restante de la operación de cribado es material de gran tamaño que no ingresa a los biorreactores y será llevado a disposición final en el relleno sanitario.
- La recolección selectiva transforma los residuos sólidos municipales residuales RSMR que ingresan inicialmente en los biorreactores en fracción orgánica de residuos municipales FORM, esto es posible debido a que los residuos orgánicos son separados de la fracción inorgánica por lo tanto el peso de residuos orgánicos aumenta progresivamente y los inorgánicos van disminuyendo hasta que finalmente obtenemos el total de fracción orgánica.
- La fracción inorgánica que ha sido separada del aumento progresivo de recolección selectiva es materia prima para obtener nuevos productos en un proceso de reciclado
- En tanto que la fracción orgánica que ingresa a los biorreactores después de proceso de digestión obtiene biogás, el cual podrá ser aprovechado energéticamente como biocombustible, obtener calor, o cogeneración para la calefacción del sistema propio de digestión anaerobia.
- El digestato es el 30% del residuo en masa después de la digestión anaerobia y puede ser valorizado para obtener compost o depositado en el relleno sanitario.

La figura 20 muestra de qué manera se va avanzando con la recolección selectiva de residuos en Ambato. Los residuos sólidos municipales residuales (RSMR) que vienen en mezcla con la fracción orgánica, van disminuyendo por que los habitantes disponen correctamente los residuos en contenedores específicos y la fracción orgánica (FORM) va en aumento conforme los habitantes de Ambato continúan avanzando en la recolección selectiva, de esta manera material orgánica llega a ser mayoritario en el tiempo y benéfica los rendimientos de la digestión anaerobia.

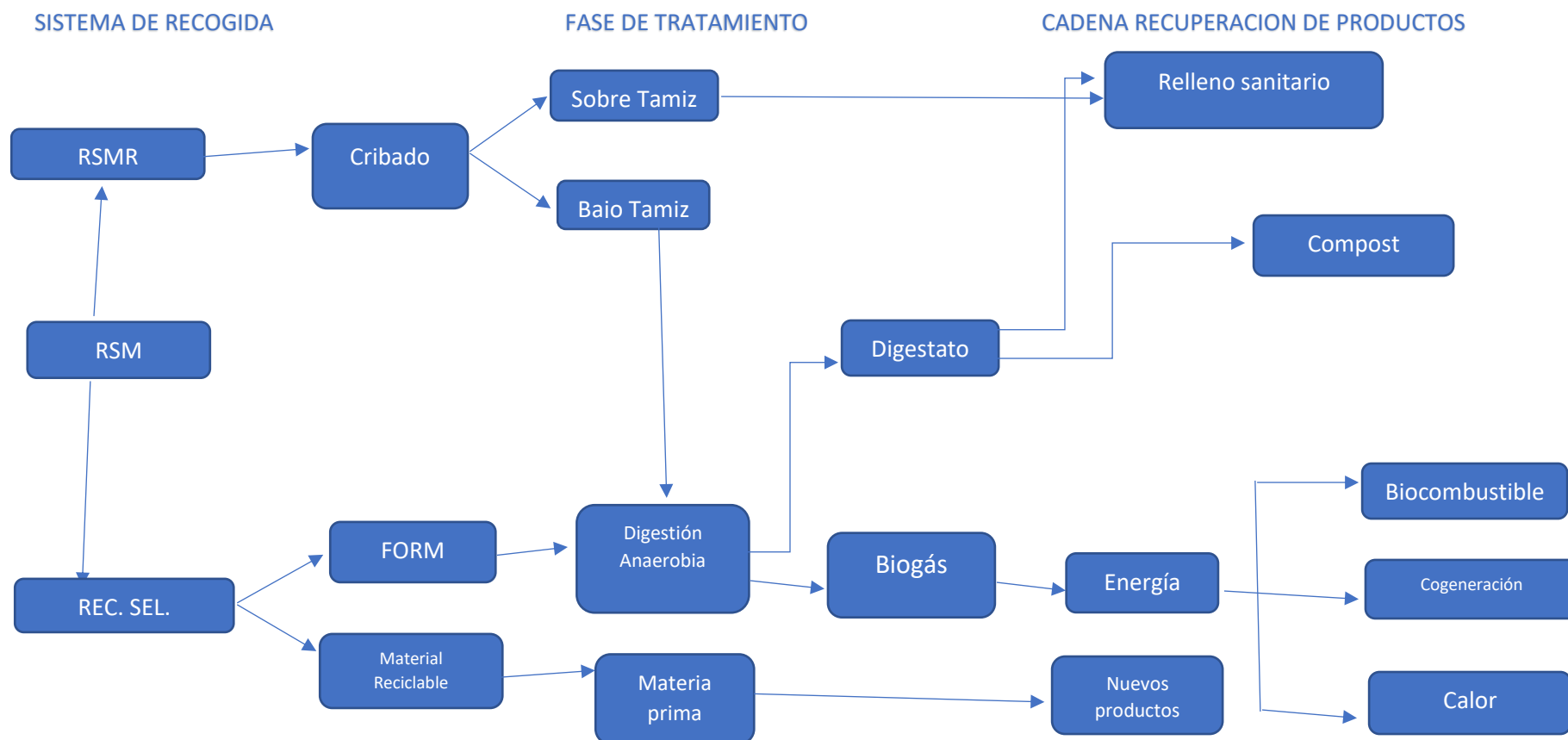


Figura 19 Diagrama de flujo teórico de residuos estudiado para el caso de Ambato-Ecuador
 Fuente: Elaboración propia

RSM: Residuos sólidos municipales
 RSMR: Residuos sólidos municipales residuales
 FORM: Fracción orgánica de residuos municipales
 REC. SEL.: Recolección selectiva

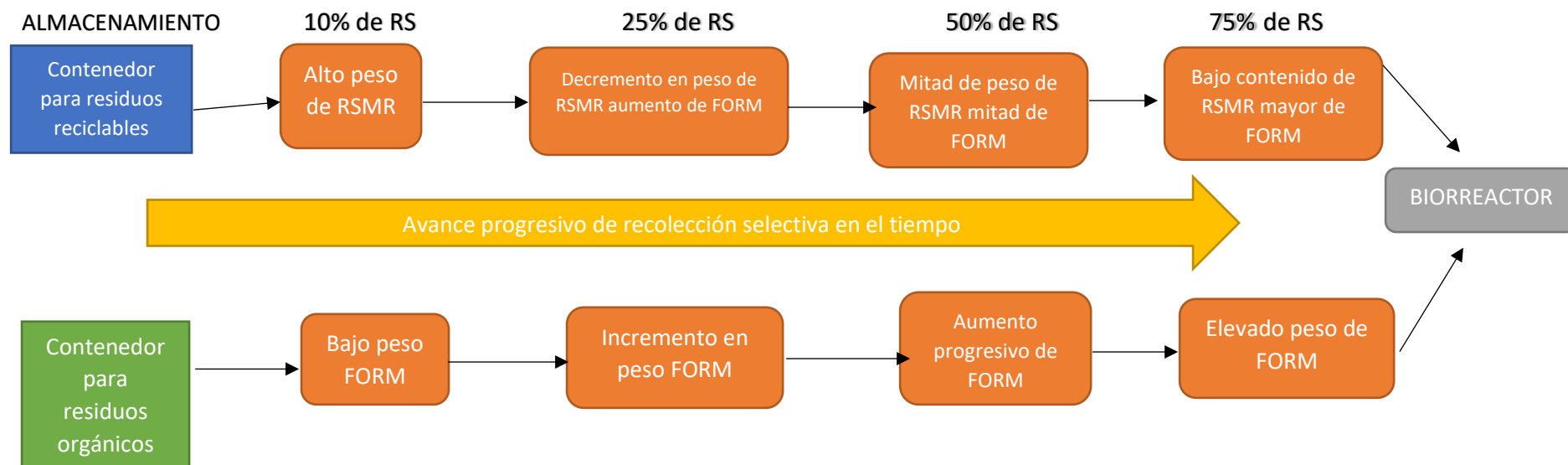


Figura 20 Avance en el tiempo de recolección selectiva
 Fuente: Elaboración propia

RS: Recolección selectiva
 RSMR: Residuos sólidos municipales residuales
 FORM: Fracción orgánica de residuos municipales

Los resultados del material digerible de ambas fracciones explicado en el apartado anterior se muestran en la tabla 12 aquellos valores que servirán de base para el cálculo del diseño del biorreactor y para calcular la producción teórica de biogás.

Tabla 12 Cantidad de residuos obtenidos para cuatro escenarios de recolección diferenciada en Ambato
Fuente: Elaboración propia

Cantidad de residuos obtenidos para 4 escenarios de recolección diferenciada Ambato					
Tipología de Residuos	unidad	10%	25%	50%	75%
RSMR	t/año	96372,05	80310,038	53540,02	26770,01
Total, cribado	t/año	39512,54	32927,12	21951,41	10975,71
Cribado por día	t/día	108,25	90,21	60,14	30,07
Fracción orgánica después de Criba	t/año	25288,02	21073,36	14048,90	7024,46
Total, de FORM con RS por año	t/año	4046,95	10117,36	20234,75	30352,13
Total, de FORM con RS por día	t/día	11,089	27,72	55,44	83,16
Residuos totales para Digestión Anaerobia	t/año	43559,49	43044,49	42186,16	41327,83

8.3 Aspectos de diseño del reactor

Todas las expresiones y modelos matemáticos que serán aplicados en este caso de estudio fueron adoptados del estudio de (Ragazzi et al. 2017).

8.3.1 Densidad de las fracciones

Para calcular el volumen de los digestores fue necesario adoptar valores de densidad para ambas fracciones FORM y RMSW detalladas en la tabla 13, y además un porcentaje de inóculo de 50%.

Tabla 13 Densidad de las fracciones de residuos que alimentan los digestores
Fuente: Ranieri, et al. 2018

Densidad	t /m ³	FORM	RSMR	Cribado RMSW	Inoculo
		0,56	0,35	0,49	0,5%

8.3.2 Cantidad de residuos digeribles

Las dimensiones estándar de los biorreactores se asumieron de 30 m de largo(l), 5 m de alto(h) y 7 m de ancho(a) y, por lo general, se rellenan hasta 3,5 m por seguridad, con el objetivo de determinar la carga de residuos en cada biorreactor. El peso de residuos sólidos municipales residuales denominado (W_{RSMR}) que puede procesarse en un biorreactor singular se calculó de la ecuación de volumen a continuación:

$$V_{\text{biorreactor}} = (L)(a)(h)$$

$$V_{\text{biorreactor}} = (30\text{m})(7\text{m})(3,5\text{m})$$

$$V_{\text{biorreactor}} = 735\text{m}^3$$

$$W_{RSMR} = (1 - \%in\acute{o}culo)(V_{\text{biorreactor}})(\delta_{\text{residuo}})$$

$$W_{RSMR} = (1 - 50\%)(735\text{m}^3)(0,49 \text{ t/m}^3)$$

$$W_{RSMR} = 180,07 \text{ ton/reactor}$$

A su vez la cantidad de residuos netamente orgánicos digeribles se calcula como:

$$W_{FORM} = (1 - \%inoculo)(V_{\text{llenado}})(\delta_{FORM})$$

$$W_{FORM} = (1 - 0,5)(735\text{m}^3)(0,56 \text{ t/m}^3)$$

$$W_{FORM} = 205,8 \text{ ton/reactor}$$

8.3.3 Cálculo del número de biorreactores

La operación de digestión anaerobia puede realizarse en temperaturas para operaciones mesofílicas y termofílicas en ciclos de 22 y 28 días respectivamente referidas en el estudio de (Nguyen et al. 2017). En este estudio adoptaremos la operación en termofílico por tener un menor tiempo de digestión. El sistema termofílico opera en 22 días de reacción a 55°C, esto significa que en un año se cumplirán 16 ciclos de 22 días, y sobrarían 13 días que serán para mantenimiento de los biorreactores.

Tabla 14 Tipos de operación para digestión anaerobia
Fuente: Nguyen et al.2017

Tipo de Operación	Temperatura °C	Días	Ciclos
Mesofílico	Optima a 35 °C	28	13/año
Termofílico	Optima a 55 °C	22	16/año

El número de reactores es el cociente entre la fracción orgánica después de la criba y la cantidad de residuos digeribles en un reactor individual multiplicado por el número de ciclos en termofílico. Se calcula mediante:

$$n_{\text{reactorRSMR.10\%RS}} = \frac{W_{\text{anual, 10\%RS, bajotamiz}}}{W_{\text{RSMR, anual}}}$$

$$n_{\text{reactorRSMR.10\%RS}} = \frac{25288,02 \text{ ton}}{\frac{180,07 \text{ ton}}{\text{reactor}}} = 8,77 = 9 \quad (16)$$

Para el cálculo del número de biorreactores correspondiente al tonelaje de la fracción orgánica de residuos municipales FORM, se considera que la densidad de FORM es distinta a la de RSMR, pero el volumen de biorreactor no varía, el resultado es el cociente entre total de fracción orgánica con recolección selectiva anual y el peso digerible en un reactor de FORM.

$$n_{\text{reactorFORM.10\%RS}} = \frac{W_{\text{anual, 10\%RS, FORM}}}{W_{\text{FORM, anual}}}$$

$$n_{\text{reactorFORM.10\%RS}} = \frac{4046,95 \text{ ton}}{205,8 \frac{\text{ton}}{\text{reactor}}} = 1,22 = 1 \quad (16)$$

Es importante destacar que los reactores no cambian sus medidas, están diseñados para recibir distintas cargas de residuos sólidos provenientes de las distintas fracciones de recolección selectiva.

8.3.4 Producción y consumo de biogás

Valores reportados en literatura (Zupančič & Grilc 2007) establecen una generación de 0,5-0,8 m³/kg SV, para un contenido total de sólidos y sólidos volátiles que varían respectivamente del 15% al 30% y del 80% al 95%, respectivamente para los residuos orgánicos municipales. La tabla 15 detalla valores de generación de biogás para distintos tipos de residuos orgánicos

Tabla 15 Contenidos de sólidos, sustancias orgánicas y rendimientos de biogás para residuos orgánicos en digestión anaeróbica
Fuente: (Zupančič i Grilc 2007)

Residuo orgánico	TS (%)	VS ² in TS (%)	Rendimiento de biogás (m ³ kg ⁻¹ de SV)
Residuo orgánico municipal	15-30	80-95	0,5-0,8
Lodos residuales municipales	3-5	75-85	0,3-0,5
Residuo cervecero	20-26	80-95	0,5-1,1
Levadura	10-18	90-95	0,5-0,7

Residuos de fermentación	4-8	90-98	0,4-0,7
Puré de fruta	4-10	92-98	0,5-0,8
Contenido de estómago de cerdos	12-15	80-84	0,3-0,4
Rumen	12-16	85-88	0,3-0,6
Residuos vegetales	12-42	90-97	0,4-0,8
Pasto verde	21-40	87-93	0,6-0,8
Pasto cortado	20-40	94-97	0,6-0,7
Ensilaje de maíz	86	89-94	0,2-0,5
Paja de cereales	6-11	68-85	0,1-0,8
Estiércol de ganado	25-30	75-85	0,6-0,8
Estiércol de cerdo	2-13	77-85	0,6-0,8
Estiércol de gallina	20-25	75-80	0,2-0,5
Estiércol de oveja	10-29	67-77	0,3-0,8
Estiércol de caballo	18-25	80-85	0,3-0,4
Residuo de leche	8	90-92	0,6-0,7
Suero	4-6	80-92	0,5-0,9

En este caso, se adoptó un valor de tasa de generación de biogás para el caso de estudio de 0,45 m³/kg SV. La caracterización de la entrada de fracción orgánica en la planta, en cambio, se definió de la siguiente manera: 73,8% de agua y 26,2% de sólidos totales (ST) de los cuales 84,6% son volátiles. Por lo tanto, se calcula que el 22,17% de la corriente orgánica entrante está compuesta de sólidos volátiles. Teniendo todos los parámetros, fue posible calcular la producción potencial de biogás (V biogás) en m³ como:

$$V_{biogás} = (m_{FORM})(\%SV)(BR)(1000)$$

Donde:

V biogás= volumen de biogás generado, en m³

mFORM= masa de la fracción orgánica bajo el tamiz, en ton

%SV= % de sólidos volátiles, en %

BR= tasa de generación de biogás, en m³/kg SV

8.4 Área de implementación del proyecto

Una vez determinados el número máximo posibles de biorreactores a operar en planta, hemos visto la necesidad de calcular un área mínima estimada para ubicar las instalaciones, y se obtuvo multiplicando el área de un biorreactor, por el número de biorreactores máximo y por un factor de corrección de 1,5 para sobreestimar dimensiones como una propuesta propia.

$$\text{Área mínima requerida} = (\text{Área bioreactor unitario})(\text{número bioreactores máximo})(1,5)$$

$$\text{Área mínima requerida} = (30m)(7m)(9)(1.5)$$

$$\text{Área mínima requerida} = 2835 \text{ m}^2$$

$$\text{Área mínima requerida} = 2835 \text{ m}^2 \frac{1 \text{ hectárea}}{10000 \text{ m}^2} = 0,2835 \text{ hectáreas}$$

A continuación, en la tabla 16, se detalla la disponibilidad del municipio de Ambato en terrenos urbanos y rurales para proyectos de gestión ambiental, donde se describen cinco alternativas. Considerando el número de propietarios para realizar una expropiación y el área mínima de hectáreas requerida se determina que la alternativa 4 en Unamuncho es más viable.

Tabla 16 Resumen de propietarios costos y alternativas para proyecto de GIRS Ambato
Fuente: Municipio Ambato, 2015

Alternativa	Ubicación - parroquia	Área (ha)	Propietarios	Costo (USD)	Costo/ha (USD)
1	Santa Rosa	35,33	132	\$ 1214 724,74	\$ 34 384,00
2	Izamba	24,38	7	\$ 793 941,09	\$ 32 565,00
3	Unamuncho	37,65	4	\$ 1 096 668,03	\$ 29 127,00
4	Cunchibamba (Barrio San Vicente)	32,38	259	\$ 1 679 705,28	\$ 51 874,00
5	Cunchibamba (Barrio San José)	77,69	2 (38 lotes)	\$ 2 816 301,70	\$ 36 252,44

Considerando el número de propietarios para realizar una expropiación y el área mínima de hectáreas requerida se determina que la alternativa 4 en Unamuncho es más viable en cuanto al número de propietarios y al precio por hectárea.

8.5 Parámetros de funcionamiento del biorreactor

Los parámetros operacionales y funcionales del proceso de digestión anaerobia descritos en el título 7.1 son calculados a continuación, y sirven de fundamento para operar la obtención de biogás en campo.

8.5.1 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico, es el tiempo de permanencia en el biodigestor y es el resultado del cociente entre el volumen de biorreactor y el flujo de residuos que llenan su volumen.

$$TRH = \frac{V}{V_c}$$

Donde:

TRH= Tiempo de retención hidráulico, en días

V= volumen del biorreactor, en m³

Vc= flujo de residuos, en m³/día

$$TRH = \frac{735m^3}{33,42 m^3/dia}$$

$$TRH=22 \text{ días}$$

8.5.2 Velocidad de carga orgánica

La concentración de materia orgánica media del sustrato es 0,45 m³ VS kg⁻¹ de residuo. Teniendo en cuenta la densidad del residuo, el volumen del reactor y la carga diaria, la velocidad de carga orgánica VCO resulta:

$$VCO = \frac{(CO_s)(VC_s)}{V_r}$$

$$VCO = \frac{(0,45m^3VSkg^{-1})(198\frac{m^3}{dia})}{735m^3}$$

$$VCO = 0,121kg \text{ SV}/m^3$$

En donde:

VCO = Velocidad de carga orgánica, en kg DQO o SV/ m³·día. cb

Vr = Volumen líquido del reactor, en m³.

COs = Concentración de materia orgánica del sustrato, en kg DQO o SV/m³.

VCs = Caudal de residuos, en m³/día.

8.5.3 Relación carbono nitrógeno

Los valores de clasificación de la fracción orgánica de residuos municipales fueron asumidos de los datos obtenidos de la ciudad de la Paz en Bolivia que cuentan con 757 184 habitantes, muy cercanos a los de la ciudad de Ambato en Ecuador y la composición en mezcla tuvo resultados similares a los de la clasificación. A continuación, los resultados en tabla 17, útiles para el cálculo de la relación carbono nitrógeno y la carga orgánica volátil.

Tabla 17 Cuantificación de subproductos de residuos orgánicos de la Paz
Fuente: Díaz de Basurto, 2013

Subproducto	Peso(g)	%
Cebolla	1566,7	21,46
Cítricos	1514,2	20,74
Acelga	606,6	8,31
Papa	470,8	6,45
Hojas verdes	291	3,99
Haba	263,7	3,61
tomate	198,1	2,71
Zanahoria	183,8	2,52
Cascara plátano	172	2,36
Hojas secas	171	2,34
Lechuga	119,3	1,63
Cascara piña	66,2	0,91
Huesos	64,5	0,88
Rábano	59,9	0,82
Papel	35	0,48
Pimiento	28,9	0,40
Remolacha	24,7	0,34
Sandia	20,1	0,28
Cascara huevo	19,3	0,26
Pipa calabaza	3,4	0,05
Mezcla inclasificable	1369,1	18,75
Total	7248,3	99,3

El carbono y el nitrógeno son las fuentes de sustrato de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. La relación C/N se calculó mediante:

$$K = \frac{(C1)(Q1) + (C2)(Q2) + \dots (Cn)(Qn)}{(N1)(Q1) + (N2)(Q2) + \dots (Nn)(Qn)}$$

Donde:

K= C/N de la mezcla de materias primas

C= % de carbono orgánico contenido en cada materia prima

N= % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima

Q= Peso fresco de cada materia prima, expresado en kg o toneladas

El peso de cada fracción de subproductos orgánicos de La Paz en la tabla 17 fueron adoptados para este cálculo al ser asimilables a los de Ambato, y el porcentaje de nitrógeno y carbono de cada residuo esta descrito en tabla 9, valores promedio aproximados de la relación carbono nitrógeno de residuos orgánicos disponibles en el medio rural.

$$K = \frac{(0,46)(1,56) + (0,58)(1,51) + (0,42)(0,6) + (0,29)(0,4) + (0,4)(0,2) + (0,38)(0,1) + (0,3)(0,1)}{(0,0053)(1,56) + (0,0064)(1,51) + (0,0063)(0,6) + (0,0053)(0,4) + (0,0075)(0,2) + (0,015)(0,1) + (0,018)(0,1)}$$

$$K = 2,1094/0,0286$$

$$K = 70: 1$$

8.5.4 Control de pH

En el presente caso de estudio, para mantener el pH óptimo en el reactor, es necesaria la suplementación de alcalinidad utilizando reactivos como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoníaco, cal, hidróxido de sodio y potasio. Se prefiere el bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad y baja toxicidad, y el control se realizará con medidores de pH. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad (Varnero Moreno, 2011).

8.5.5 Cálculo del flujo de calor

El cálculo del flujo de calor viene dado por la siguiente ecuación, donde se determina la cantidad de calor necesario que se deberá suministrar para elevar a la temperatura (55°C) deseada en el biorreactor:

$$Q = (m)(cp)(\Delta T)$$

El valor de la capacidad calorífica de la fracción orgánica de residuo municipal fue asumida del estudio de (Komilis et al. 2012) correspondiente a la capacidad calorífica de los residuos orgánicos municipales en la ciudad de Creta en Grecia.

Donde:

Q= Flujo de calor necesario para elevar la sustancia a la temperatura ideal

m= masa del fluido

Cp= Capacidad calorífica del residuo

ΔT = Gradiente de temperatura a la que se produce la reacción

$$Q = (217000kg) \left(\frac{25208,72KJ}{KgK} \right) (328,15K - 291,15K)$$

$$Q = 2,02E^{11}KJ$$

8.6 Características generales de calidad del biogás

La norma internacional ISO 20675:2018 detalla, define términos y describe clasificaciones relacionadas con la producción de biogás por digestión anaeróbica, gasificación de biomasa y energía a gas de fuentes de biomasa, acondicionamiento de biogás, mejora de biogás y utilización de biogás desde una perspectiva de seguridad, medio ambiente, rendimiento y funcionalidad, durante el diseño y fabricación, instalación, construcción, prueba, puesta en marcha, aceptación, operación, inspección periódica y fases de mantenimiento. Está disponible en: <https://www.iso.org/standard/68794.html> a un precio actual de 118 francos suizos.

El biogás tiene propiedades específicas de calidad y de acuerdo al *Manual del Biogás* por (Varnero Moreno, 2011) los rangos de parámetros que indican la calidad de biogás se detallan a continuación:

Tabla 18 Propiedades de calidad de biogás
Fuente: Varnero Moreno, 2011

Composición	55-70% metano CH ₄ 30-45% dióxido de carbono CO ₂ Trazas de otros gases
Contenido energético	6,0 – 6,5 kWh m ⁻³
Equivalente de combustible	0,60-0,65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6-12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750 °C (para el contenido de CH ₄ mencionado)

<i>Presión crítica</i>	74-88 atm
<i>Temperatura crítica</i>	-82,5 °C
<i>Densidad normal</i>	1,2 kg m ⁻³
<i>Olor</i>	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
<i>Masa molar</i>	16,04 kg kmol ⁻¹

8.7 Análisis Económico

A continuación, se presenta el presupuesto para una planta de tratamiento de residuos sólidos municipales para Ambato y una planta piloto para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales (FORM) pensada en la ejecución de pruebas a escala piloto antes de pasar a la etapa de construcción y operación del proyecto.

8.7.1 Análisis económico para implementación de una planta industrial de tratamiento de residuos municipales

Enviromental Green Enginereeing empresa constituida legalmente, domiciliada en c/ Les Comes 18, 08700 Igualada Barcelona, y cuya actividad principal es la realización de proyectos de ingeniería para el sector del tratamiento integral de residuos sólidos urbanos oferta la siguiente cotización para el municipio de la ciudad de Ambato Ecuador:

Tabla 19 Presupuesto para construcción de planta industrial de tratamiento de residuos municipales para Ambato
Fuente: Enviromental Green Enginereeing

Presupuestos de las plantas a construir en polígono industrial	
Planta de tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales y recuperación de materiales reciclables	
Planta de clasificación de plásticos por composición química y color	
Planta de fabricación de pellets plásticos	
Planta de reciclaje de vidrio	
Planta de biogás	
Planta de generación de energía eléctrica	
Planta de compostaje	
Costos de urbanización del polígono industrial	

Vías	
Alumbrado de vías	
Instalación exterior contraincendios	
Instalación contra rayos	
Depuración aguas sanitarias	
Canalizaciones pluviales	
Jardinería y obras de mitigación de impacto ambiental	
Total	82,52 millones de euros

Este presupuesto referencial contempla el tratamiento de todos los residuos sólidos municipales generados en Ambato, incluido la planta de digestión anaerobia para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos municipales, el objetivo es tener un presupuesto de referencia que sirva al municipio de Ambato como instrumento para presupuestar o solicitar un crédito para la implementación de este sistema de tratamiento

8.7.2 Análisis económico y operacional de una planta piloto para digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos

La tabla 19 muestra el costo de construcción de una planta piloto para digestión anaerobia descrita en el presente trabajo. El precio de construcción se clasifica en la construcción del biodigestor piloto, los accesorios de fontanería, medidores, reactores y los otros conceptos que se han tenido en cuenta basados en una proforma de la empresa SIDILAB.

Tabla 20 Cotización de planta piloto de digestión anaerobia para residuos orgánicos
Fuente: SIDILAB, 2018

Concepto	Cantidad	Capacidad	Precio Unitario
Depósitos de acero inoxidable			
Reactor etapa 1	1	20L	
Reactor etapa 2	1	70L	
Depósito de sustrato	1	25L	
Depósito de digestato	1	25L	
Bombas			

Bombas peristálticas	3	25L/h	
Bombas dosificadoras	2	2,1L/h	
Bomba de calefacci3n	1	480L/h	
Mecanismos de agitaci3n			
Dep3sito de sustrato	1	200min ⁻¹	
reactores	1	120min ⁻¹	
Total			131500 euros

8.7.3 Operaci3n de planta piloto

Es necesario operar la digesti3n anaerobia de residuos orgánicos de Ambato en primer lugar en una planta piloto que permita controlar todos los parámetros operacionales, no podemos pasar a fase de construcci3n en campo sin antes realizar operaciones en planta piloto para cuantificar resultados.

La planta piloto CE 642 (Ver Anexo1) demuestra de forma prÁctica la generaci3n de biogás. Como sustrato se utiliza una suspensi3n de materias s3lidas orgánicas trituradas. En el primer reactor de tanque con agitaci3n tiene lugar la hidr3lisis y la acidificaci3n del sustrato. En este proceso, los microorganismos anaerobios transforman sustancias orgánicas de cadena larga en sustancias orgánicas de cadena corta. En el segundo reactor de tanque con agitaci3n, en la última fase de la degradaci3n anaerobia se produce biogás, compuesto principalmente por metano y di3xido de carbono.

Mediante este modo de funcionamiento de dos etapas, se pueden ajustar y optimizar por separado las condiciones ambientales en ambos reactores. El digestato se recoge en un dep3sito separado. La temperatura y el pH se regulan en ambos reactores. El biogás producido se seca en una columna. La columna contiene gel de sílice. A continuaci3n, se registran el caudal, la humedad, el contenido de metano, el contenido de di3xido de carbono y la temperatura del biogás. El control de la instalaci3n y la adquisici3n de datos se realizan con un PLC, manejado a trav3s de una pantalla táctil. Los valores medidos se pueden almacenar y procesar con ayuda del software GUNT para la adquisici3n de datos. La transferencia al PC se realiza a trav3s de una interfaz USB.

La planta de ensayo permite una operaci3n continua y discontinua. Para los ensayos se requiere de biomasa de una planta de biogás. Para la producci3n del sustrato se pueden utilizar p. ej. patatas o ma3z. Para enjuagar la planta de ensayo se requiere de gas inerte como el di3xido de carbono.

9 Resultados

9.1 Número de reactores

A continuación, en tabla 20 se detallan el número de reactores para digestión anaerobia de FORM y RMSM con capacidad para trabajar todo el año en ciclos de 22 días de digestión cada uno.

Tabla 21 Número de reactores para cada fracción de recogida selectiva
Fuente: Elaboración propia

Nro. reactores	Longitud reactores	Recolección Selectiva			
		10%	25%	50%	75%
FORM	30	1	3	6	9
RSMR	30	9	7	5	3

9.2 Cantidad de residuos digeribles y cargas diarias en biorreactores

El cálculo de aforo de cada biorreactor se obtiene dividiendo el tonelaje de capacidad de cada biorreactor, de acuerdo al tipo de residuo que ingresa, dividido para el tonelaje diario del tipo correspondiente de residuos generado, esto nos da como resultado el número de días en que se llena por completo de residuos un biorreactor. Para determinar el número de días que se llenan todos los biorreactores calculados, multiplicamos por el número de biorreactores totales.

Tiempo de llenado de cada reactor para RSMR 10% de RS

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{\text{dia}}{69,28\text{ton}} = \frac{2,6\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{69,28\text{ton}} 9\text{reactor} = 23,4 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para RSMR 25% de RS

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{\text{dia}}{57,73\text{ton}} = \frac{3,12\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{57,73\text{ton}} 7\text{reactor} = 21,84 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para RSMR 50% de RS

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{\text{dia}}{38,49\text{ton}} = \frac{4,67\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{38,49\text{ton}} 5\text{reactor} = 23,39 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para RSMR 75% de RS

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{19,24\text{ton}} = \frac{9,35\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{180,07\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{19,24\text{ton}} 3\text{reactor} = 28 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para FORM 10% de RS

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{11,08\text{ton}} = \frac{18,50\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{11,08\text{ton}} 1\text{reactor} = 19 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para FORM 25% de RS

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{27,72\text{ton}} = \frac{7,39\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{27,72\text{ton}} 3\text{reactor} = 22 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para FORM 50% de RS

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{55,43\text{ton}} = \frac{3,7\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{55,43\text{ton}} 6\text{reactor} = 22,2 \text{ dias}$$

Tiempo de llenado de cada reactor para FORM 75% de RS

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{83,15\text{ton}} = \frac{2,5\text{dias}}{\text{reactor}}$$

$$\frac{205,08\text{ton}}{\text{reactor}} \frac{1\text{dia}}{83,15\text{ton}} 9\text{reactor} = 20,7 \text{ dias}$$

9.3 Producción de Biogás

Se llevó a cabo un análisis simplificado para evaluar la posible generación de biogás, a partir del avance de recolección selectiva en ambos residuos sólidos FORM y RSMR obteniéndose los siguientes resultados: (ver tabla 22, figura21)

Tabla 22 Producción teórica de biogás de la recolección selectiva
Fuente: Elaboración propia

Obtención de Biogas					
Tipo de residuo		10%	25%	50%	75%
RSMR	m³/año	2503,51	2086,26	1390,84	695,42
FORM	m³/año	400,65	1001,62	2003,4	3004,86
TOTAL	m³/año	2904,16	3087,88	3394,24	3700,28

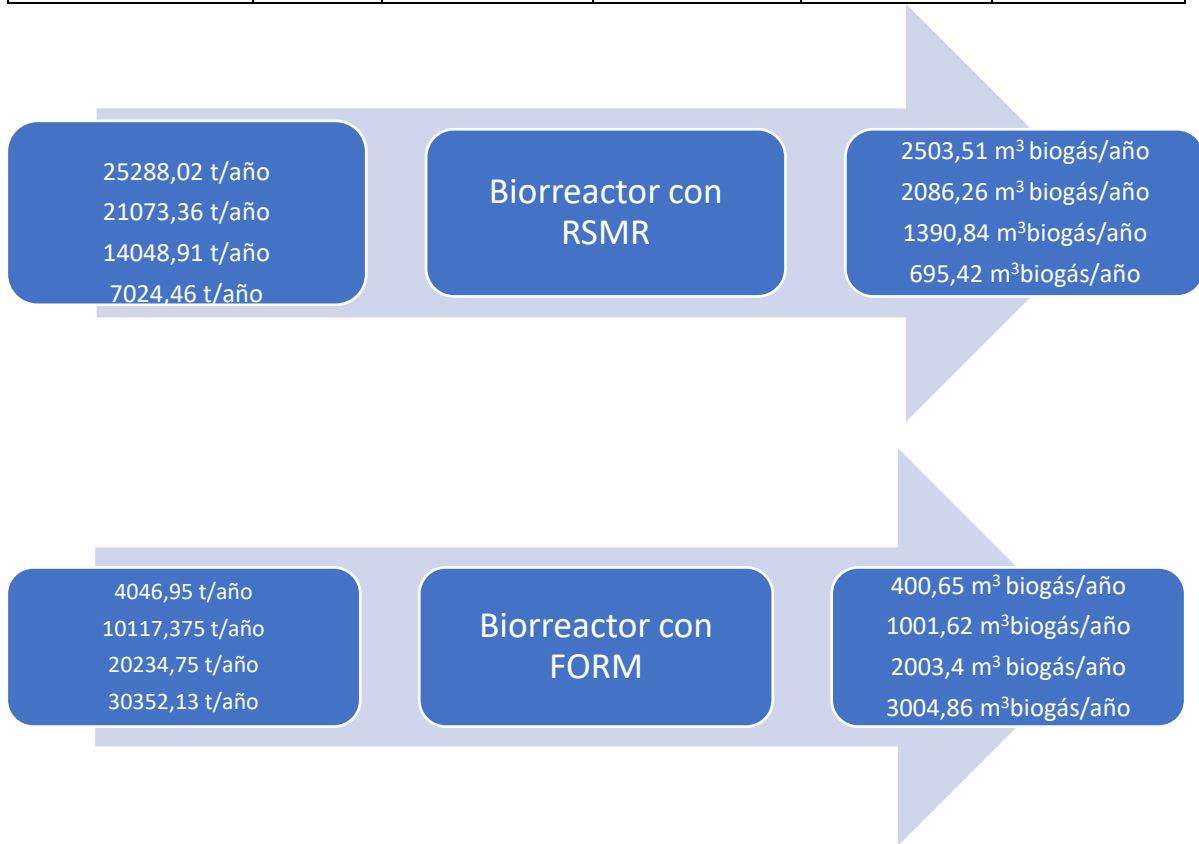


Figura 21 Balance de masas del proceso de digestión anaerobia
Fuente: Elaboración propia

9.4 Parámetros de control del biorreactor

La tabla 23 resume los parámetros de control y funcionamiento del biorreactor para obtención de biogás a partir de la fracción orgánica de residuos municipales de Ambato:

Tabla 23 Resumen de parámetros de funcionamiento de biorreactor para residuos orgánicos
Fuente: Elaboración propia

Parámetros de Diseño y Control	Valores
Carga (ton/reactor)	217
TRH	22
Temperatura (C)	55
Densidad (ton/m ³)	0,56
Volumen (m ³)	735
VCO (kg SV/m ³)	0,121
Relación C/N	70:1
Flujo de calor (KJ)	$1,79E^{12}$

9.5 Diseño y funcionamiento

9.5.1 Operación en discontinuo

El diseño del biorreactor anaerobio para residuos orgánicos de operación discontinua y un sistema de recirculación de percolado se presenta a continuación. La planta completa consta de un reactor anaerobio, un sistema de recirculación, y una minicentral de cogeneración de biogás a energía eléctrica. Ver figura 22

- El sistema trabaja de acuerdo al tiempo de llenado de cada tipo de residuo determinado en 9.2. Para ello se deberá contar 22 días de reacción desde el primer ingreso de residuos en cada uno.
- Una vez transcurrido este tiempo se debe vaciar el digestato del reactor correspondiente
- Las cargas diarias de residuos deberán empezar a llenar el reactor vacío mientras el siguiente biorreactor es vaciado.
- Este proceso es cíclico y no se interrumpe en el tiempo al estar calculado para un año de 16 ciclos, y 13 días de mantenimiento programado.



Figura 22 Tiempos de llenado de biorreactores para digestión anaerobia de residuos sólidos de Ambato
Fuente: Elaboración propia

9.5.2 Plano del biorreactor para residuos sólidos municipales de Ambato

El plano en dos dimensiones que se presenta a continuación (vista superior y corte longitudinal) en la figura 23 fue diseñado con el software AutoCAD 2017 en base a biorreactores para residuos orgánicos que oferta la empresa BEKON (Biogas technologie & Biogasanlagen) en Alemania. Se encuentra a escala real, con las medidas que han sido adoptadas para este caso de estudio.

BIOREACTOR PARA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE FORM

VISTA LATERAL

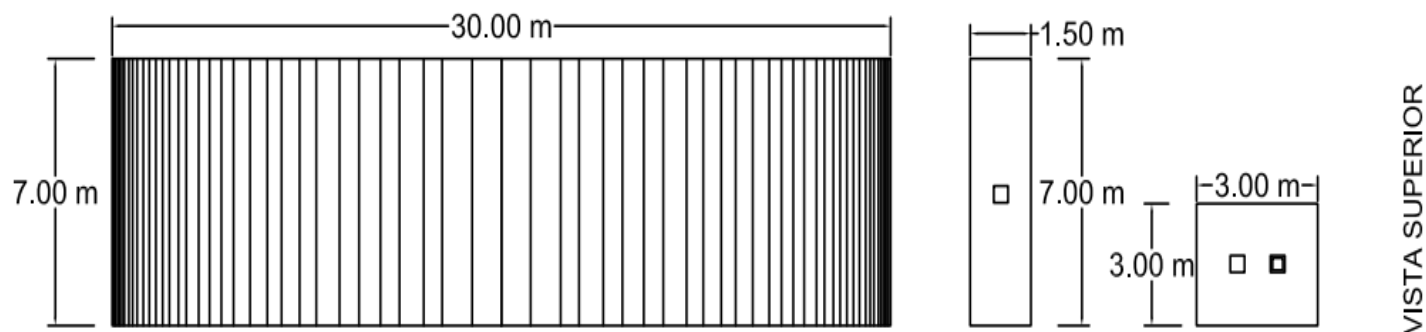
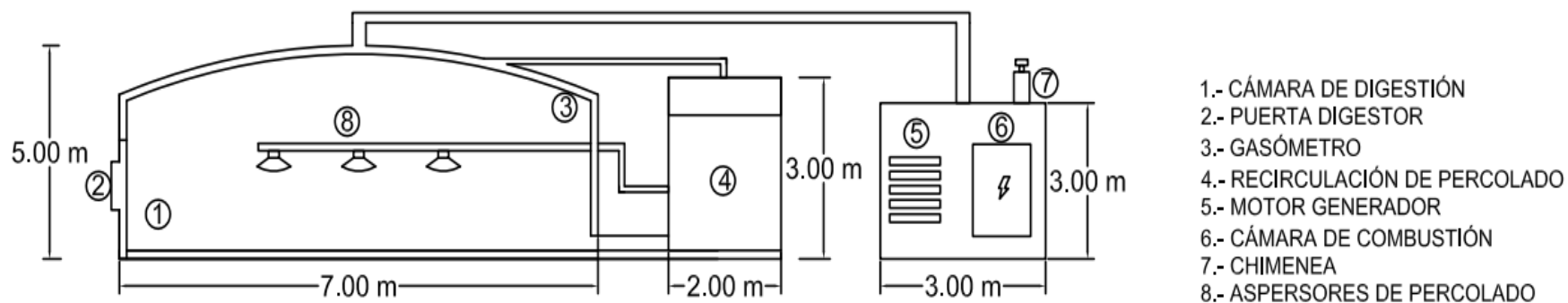


Figura 23 Diseño de planta de digestión anaerobia para residuos sólidos orgánicos de Ambato

Fuente: Elaboración propia

10 Conclusiones

- La implementación de una planta de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos con bajas tasas de recolección selectiva es factible en ciudades como Ambato, debido a la alta producción de residuos orgánicos por día y a la ausencia de la valorización de este residuo lo cual directamente tiene beneficios económicos, ambientales y sociales, aumentando la vida útil del relleno sanitario, disminuyendo el impacto ambiental que produce enterrar los residuos y controlar sus emisiones y el valor agregado de generar energía renovable.
- Se calculó el número de biorreactores para tratar los residuos sólidos municipales de Ambato determinándose que para un avance de recolección selectiva de 10%,25%,50%,75%, se necesitan 9,7,5,2 biorreactores que tratan residuos sólidos orgánicos con material inorgánico en mezcla. Para tratar residuos orgánicos con las mismas tasas de recolección selectiva en aumento se necesitaron 1,3,6,9 biorreactores.
- La cantidad teórica de gas calculada en este estudio determina que la fracción orgánica de residuos municipales (FORM) genera más gas que los residuos sólidos municipales residuales (RSMR) y además su producción se incrementa conforme la recolección selectiva aumenta progresivamente en el tiempo debido al aumento de residuos sólidos orgánicos y la constante disminución de material inorgánico.
- Se propusieron biorreactores discontinuos de (30)(7)(5) metros con un sistema de recirculación de percolado y una unidad generadora de energía que trabaja para diferentes incrementos de residuos en el tiempo y operan en discontinuo con ciclos de 22 días de fermentación cada uno.

11 Bibliografía

Agencia de Residuos de Catalunya. 2018. Agencia de Residuos de Catalunya. [En línea] 2018. [Citado el: 30 de marzo de 2018.] <http://www.arc-cat.net/ca/publicacions/pdf/agencia/cataleg.pdf>.

Campos, E. y Flotats, X., 2012. *Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje*. Madrid : Ediciones Diaz de Santos, 2012.

Casas, J.M. Torras, A. 2005. *Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos*. Barcelona : Metrópolis, 2005.

Díaz de Basurto, A. 2013. *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de tiquipaya (Bolivia)*. La Paz : Universidad Politecnica de Catalunya, 2013.

Díaz, L. y Loza, G. 2015. *Plan Integral de Residuos Sólidos para el Cantón Ambato*. Quito : EarthGreen, 2015.

Generalitat de Catalunya;. 2010. Agència de Residus de Catalunya. [En línea] 18 de 06 de 2010. [Citado el: 22 de 02 de 2018.] http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/residus_municipals/model_catal.

Gonzales, F. 1994. *Historia General de la Republica del Ecuador*. 1994. Tomo 2.

Gómez, X. et al., 2006. The production of hydrogen by dark fermentation of municipal solid wastes and slaughterhouse waste: A two-phase process. A: *Journal of Power Sources*. Vol. 157, núm. 2, p. 727-732. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2006.01.006.

INEC. 2015. *Estadísticas de informacion ambiental económica en gobiernos autonomos descentralizados municipales girs-2015*. Quito : INEC, 2015.

INEN. 2014. *Gestión ambiental. estandarización de colores para recipientes de deposito y almacenamiento temporal de residuos solidos*. Quito : INEN, 2014.

INTECH. 2011. *Key Areas in Waste Management: A South African Perspective*. 2011.

Interempresas. 2018. Interempresas. [En línea] 23 de 03 de 2018. [Citado el: 22 de Marzo de 2018.] <http://www.interempresas.net/reciclaje/Productos/Contenedores-para-recogida-selectiva.html#!Producto-Contenedores-de-carga-lateral-Duo-122560>.

Komilis, D. et al., 2012. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. A: *Waste Management* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 32, núm. 3, p. 372-381. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2011.10.034. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>.

Nguyen, D. et al., 2017. Dry semi-continuous anaerobic digestion of food waste in the mesophilic and thermophilic modes: New aspects of sustainable management and energy recovery in South Korea, A. *Energy Conversion and Management* [en línea]. Elsevier Ltd, Vol. 135, p. 445-452. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.12.030. Disponible a:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.030>.

Ministerio del Ambiente de Ecuador. 2014. *Diagnostico de la Cadena de Gestion Integral de Desechos Sólidos-Reciclaje*. Quito : Vicepresidencia del Ecuador, 2014.

Organización Mundial de la Salud. 2002. *Analisis sectorial de residuos sólidos en Ecuador*. Quito : s.n., 2002.

Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos solidos municipales-determinación de la generación. . Norma Mexicana. 1985. 1985, NMX-AA-61-1985, pág. 61.

Ragazzi, M. et al. 2017. Anaerobic digestion as sustainable source of energy: A dynamic approach for improving the recovery of organic waste. A: *Energy Procedia* [en línea]. Elsevier B.V., Vol. 119, p. 602-614. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.07.086. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.086>.

Ranieri, L. et al. 2018. Energy recovery from the organic fraction of municipal solid waste: A real options-based facility assessment. A: *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 10, núm. 2. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su10020368.

Varnero, M. 2011. *Manual de Biogás*. Santiago de Chile : FAO, 2011.

Verma, S. 2002. *Anerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes*. s.l. : Columbia University, 2002.

Vilches, R. 2015. *Caracterización y determinación de la producción per cápita de residuos sólidos generados en la ciudad de Ambato*. Quito : SOTAM, 2015.

Zhao, W. et al., 2018. Resource impacts of municipal solid waste treatment systems in Chinese cities based on hybrid life cycle assessment. A: *Resources, Conservation and Recycling* [en línea]. Elsevier, Vol. 130, núm. December 2017, p. 215-225. ISSN 18790658. DOI 10.1016/j.resconrec.2017.12.004. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.004>.

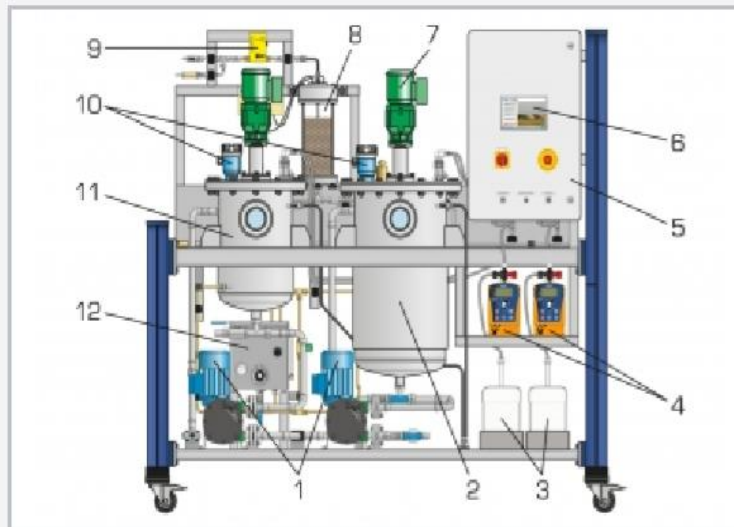
Zupančič, G. y Grilc, V., 2007. Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste. A: *Management of Organics Waste* [en línea]. Vol. 2, p. 198. DOI 10.5772/32756. Disponible a:

12 Anexos

12.1 Planta piloto de biogás CE 642

CE 642

Planta de biogás



1 bombas peristálticas, 2 reactor [etapa 2], 3 depósitos para ácido y álcali, 4 bombas dosificadoras, 5 armario de distribución, 6 PLC con pantalla táctil, 7 mecanismo de agitación, 8 columna de secado, 9 caudalímetro [biogás], 10 sensores de nivel capacitivo, 11 reactor [etapa 1], 12 depósito de agua de calefacción

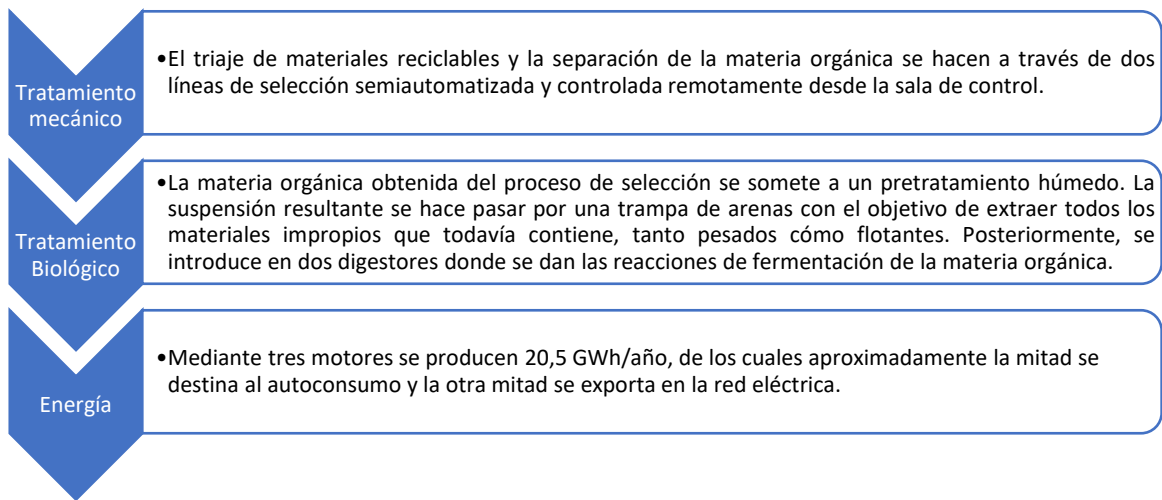
Especificación

- [1] planta de biogás de dos etapas [es posible el funcionamiento continuo o discontinuo]
- [2] 2 reactores de agitación de acero inoxidable con sensores de nivel capacitivo
- [3] unidad de alimentación separada con depósito de sustrato y bomba de alimento
- [4] regulación de temperatura y pH en los reactores
- [5] 2 bombas dosificadoras para ácido y álcali
- [6] circuito de agua de calefacción con depósito, dispositivo de calefacción, regulador de temperatura y bomba
- [7] secado del biogás con gel de sílice
- [8] análisis de biogás: caudal, contenido de metano, contenido de dióxido de carbono, humedad y temperatura
- [9] control de la planta de ensayo mediante un PLC [operable a través de pantalla táctil]
- [10] software GUNT para la adquisición de datos a través de USB en Windows Vista o Windows 7

12.2 Planta de tratamiento mecánico-biológico de Sant Adrià de Besòs

Con el objetivo de valorar insitu la operación de una planta de digestión anaerobia de residuos municipales, se realizó la visita al ecoparque de Sant Adrià de Besòs en Barcelona en mayo del 2017

La Planta de Tratamiento Mecánico-Biológico (PTMB), está ubicada al término municipal de Sant Adrià de Besòs (Barcelona) y trata la fracción resto de los residuos municipales procedentes de Badalona, Sant Adrià de Besòs, Santa Coloma de Gramenet y Barcelona. El sistema mecánico biológico consta de 3 etapas:



La fracción resto, corresponde a los residuos que no se han recogido selectivamente y que pueden contener todavía entre un 30% y un 40% de materia orgánica y los residuos cumplen con el siguiente diagrama de flujo. Ver figura 24



Figura 24 Diagrama de flujo de residuos Ecoparque Sant Adrià de Besòs
Fuente: Tera, 2018

Ficha técnica del biorreactor anaerobio

Capacidad de tratamiento: 260 000 t/año

Superficie construida: 1,2 ha

Producción de biogás: 108 millones de Nm³/año

Producción de energía eléctrica: 20,5 Gwh/año

Tipo de operación: Continuo

Tiempo de residencia: 14-21 días

Temperatura: 35 °C



*Figura 25: Biorreactor de residuos orgánicos de Sant Adrià de Besòs.
Fuente: Elaboración propia*